



TUGAS AKHIR - TF 141581
OPTIMISASI KONDISI OPERASI CO_2 FOAM FLOODING
ENHANCED OIL RECOVERY

HAMZAH YUDHA PERWIRA
NRP. 02311440000095

Dosen Pembimbing
Totok Ruki Biyanto, Ph.D.
Assoc. Prof. Dr. Sonny Irawan

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TF 141581
OPTIMIZATION OF OPERATION CONDITION CO₂ FOAM
FLOODING ENHANCED OIL RECOVERY

HAMZAH YUDHA PERWIRA
NRP. 02311440000095

Supervisor
Totok Ruki Biyanto, Ph.D.
Assoc. Prof. Dr. Sonny Irawan

DEPARTEMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Hamzah Yudha Perwira
NRP : 02311440000095
Departemen/Prodi : Teknik Fisika/S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Optimisasi Kondisi Operasi *CO₂-foam Flooding Enhanced Oil Recovery*” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 11 Mei 2018

Pembuat Pernyataan,

Hamzah Yudha Perwira

NRP. 02311440000095

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

^u OPTIMISASI KONDISI OPERASI CO_2 -FOAM FLOODING ENHANCED OIL RECOVERY

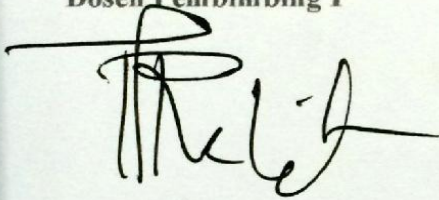
Oleh:

Hamzah Yudha Perwira
NRP. 023114 4000 0095

Surabaya, 24 Juli 2018

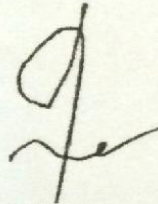
Menyetujui

Dosen Pembimbing I



Totok Ruki Bivanto, Ph.D.
NIPN. 19710702 199802 1 001

Dosen Pembimbing II



Assoc. Prof. Dr. Sonny Irawan
Staff ID. 127604

Mengetahui,
Kepala Departemen Teknik Fisika ITS



Agus Muhammad Hatta, ST, M.Si., Ph.D.
NIPN. 19730607 200312 1 002

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMISASI KONDISI OPERASI CO₂ FOAM FLOODING ENHANCED OIL RECOVERY

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

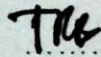


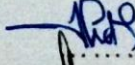

Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

HAMZAH YUDHA PERWIRA

NRP. 02311440000095

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Totok Ruki Biyanto, Ph.D.  (Pembimbing 1)
2. Assoc. Prof. Dr. Sonny Irawan  (Pembimbing 2)
3. Hendra Cordova, ST, MT  (Penguji 1)
4. Ir. Matradji, M.Sc.  (Penguji 2)
5. Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc.  (Penguji 3)

SURABAYA
Juli, 2018

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

OPTIMISASI KONDISI OPERASI CO₂ *FOAM FLOODING* *ENHANCED OIL RECOVERY*

Nama Mahasiswa : Hamzah Yudha Perwira
NRP : 02311440000095
Departemen : Teknik Fisika
Dosen Pembimbing : Totok Ruki Biyanto, Ph.D.
Assoc. Prof. Dr. Sonny Irawan

Abstrak

Saat ini, teknik yang paling banyak digunakan pada operasi ladang minyak adalah *Enhanced Oil Recovery* (EOR). Terdapat beberapa metode EOR yang dikembangkan antara lain *thermal recovery*, *chemical flooding* dan *miscible flooding*. Tipe injeksi gas menggunakan CO₂, nitrogen dan hidrokarbon gas dikategorikan sebagai *miscible flooding*. Gas merupakan fluida yang ideal untuk mendapatkan lebih banyak *oil recovery*. Namun, tantangan terbesar yang berkaitan dengan injeksi gas adalah efisiensi penyapuan volumetrik yang rendah, hasilnya gas tidak banyak berkontak dengan fraksi minyak. Sehingga, *overall recovery* tetap rendah. Oleh karena itu, injeksi CO₂ dikombinasikan dengan *foam* pada reservoir digunakan untuk mengatasi masalah ini. Injeksi CO₂ didapatkan dari distribusi *Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS) units*. Injeksi *foam*, didapatkan dari surfaktan. Injeksi CO₂-*foam* ini memerlukan biaya yang tidak sedikit, baik dalam investasi maupun biaya operasional. Biaya operasional terdiri dari biaya pembelian CO₂-*foam* dan biaya injeksi. Biaya-biaya ini tergantung pada konsentrasi surfaktan, temperatur injeksi, tekanan injeksi dan laju aliran massa. Oleh karena itu, dibutuhkan optimisasi pada kondisi operasi. Optimisasi dilakukan dengan menggunakan dua algoritma optimisasi stokastik, yakni *Genetic Algorithm* dan *Duelist Algorithm*. Hasil optimisasi menunjukkan perbedaan profit yang didapatkan. Profit dapat dimaksimalkan dari 14350.15 USD/hari menjadi 25978.15 USD/hari.

Kata Kunci: Optimisasi; EOR; CO₂-*foam*; Algoritma Stokastik.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

OPTIMIZATION OF OPERATION CONDITION CO₂ FOAM FLOODING ENHANCED OIL RECOVERY

Name : Hamzah Yudha Perwira
NRP : 0231144000095
Department : Department of Engineering Physics
Supervisor : Totok Ruki Biyanto, Ph.D.
Assoc. Prof. Dr. Sonny Irawan

Abstract

Nowadays, the most applied technique in oilfield operation is Enhanced Oil Recovery (EOR). There are several EOR methods have been developed and implemented including thermal recovery, chemical flooding and miscible flooding. Type of gases injection such as carbon dioxide, nitrogen, flue gas and hydrocarbon gas are categorized as solvent flooding. Gas is an ideal fluid to produce more oil recovery. However, the major challenge associated with gas injection is poor volumetric sweep efficiency, as a result, gas does not contact a large fraction of oil. Thus, the overall recovery remains low. Therefore, injection of CO₂ combined with foam to the reservoir is used to overcome this problem. Injection of CO₂ is obtained through the distribution of Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS) units. The injection of foam is obtained from surfactants. It requires considerable cost to use this technology, in term of investment and operational costs. Operational costs consist of purchasing price and amount of CO₂-foam injection. These costs vary depend on the concentration of surfactant, injection temperature, injection pressure and mass flow rate. Therefore, the optimization of operating condition is required. The optimization is done using two stochastic optimization algorithm, there are Genetic Algorithm and Duelist Algorithm. The optimization results show different profit achievement. The profit can be maximized from 14350.15 USD/day to 25978.15 USD/day.

Keywords: Optimization; EOR; CO₂-foam; Stochastic Algorithm.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah S.W.T, karena rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir ini. Tidak lupa juga penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada keluarga dan para sahabat. Oleh karena dukungan mereka, penulis mampu menyusun laporan tugas akhir yang berjudul:

OPTIMISASI KONDISI OPERASI CO₂ FOAM FLOODING ENHANCED OIL RECOVERY

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi dalam Program Studi S-1 Teknik Fisika FTI-ITS. Penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Agus Muhammad Hatta, ST, MSi, Ph.D. selaku kepala departemen Teknik Fisika ITS
2. Totok Ruki Biyanto, Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir ini, yang selalu memberikan semangat dan ide-ide baru. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di departemen Teknik Fisika ITS
3. Rekan-rekan F49 dan warga HMTF ITS yang senantiasa memberikan motivasi dan perhatian
4. Rekan-rekan dan laboran dari Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol Teknik Fisika ITS
5. Segenap keluarga penulis yang telah memberikan dukungan moral dan materiil terhadap penyelesaian tugas akhir ini.
6. Teman-teman organisasi di luar kampus yang membuat penulis semangat untuk terus menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa mungkin masih ada kekurangan dalam laporan ini, sehingga kritik dan saran penulis terima. Semoga laporan ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis dan pihak yang membacanya

Surabaya, 15 Juli 2018
Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
Abstrak.....	ix
Abstract	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan.....	3
1.4. Lingkup Kerja.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Mekanisme <i>Recovery</i> untuk <i>Crude Oil Reservoir</i>	5
2.2. <i>Foam</i>	6
2.3. <i>Foam</i> sebagai metode <i>Enhanced Oil Recovery</i>	8
2.4. Permeabilitas.....	9
2.5. <i>Reynold Number</i>	10
2.6. Metode Begg's-Brill	11
2.7. Porositas	16
2.8. Pemodelan Transfer Panas pada <i>Injection</i> dan <i>Production</i> <i>Well</i>	17
2.9. Pemodelan Transfer Panas pada <i>Reservoir</i>	17
2.10. <i>Genetic Algorithm (GA)</i>	19
2.11. <i>Duelist Algorithm (DA)</i>	21
BAB III METODOLOGI	23
3.1. Penentuan Input <i>CO₂ Foam Flood Operation</i> dan <i>Reservoir Formation Properties</i>	24
3.2. Penentuan Fungsi Objektif	24
3.3. Pemodelan <i>CO₂ foam flood operation</i>	25
3.4. Validasi model dengan perangkat lunak PIPESIM dan COMSOL <i>Multiphysics</i>	27

3.5. Perhitungan peningkatan produksi minyak dan biaya operasional injeksi	27
3.6. Optimisasi CO ₂ <i>foam flood operation</i>	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1. Hasil Pemodelan Tekanan dan Temperatur pada <i>Injection well</i> dengan Persamaan Begg's-Brill	33
4.2. Hasil Pemodelan Tekanan dan Temperatur pada Reservoir dengan Persamaan Darcy	36
4.3. Hasil Pemodelan Tekanan dan Temperatur pada <i>Production Well</i> dengan Metode Begg's-Brill	38
4.4. Hasil Perhitungan <i>Oil Recovery</i> dan Biaya Operasional	40
4.5. Analisis Sensitivitas	41
4.6. Optimisasi CO ₂ - <i>Foam Flood Operation</i>	45
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	51
5.1. Kesimpulan	51
5.2. Saran	52
DAFTAR PUSTAKA	53
LAMPIRAN	57
BIODATA PENULIS	163

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Foam</i> sistem secara umum [7]	6
Gambar 2.2	Skema dari mekanisme <i>lamellae division</i> [6]	7
Gambar 2.3	Skema mekanisme <i>snap-off</i> [6]	7
Gambar 2.4	Skema mekanisme <i>leave-behind</i> [6]	8
Gambar 2.5	Skema injeksi <i>foam-gas</i> dibandingkan dengan injeksi gas [13]	9
Gambar 2.6	Diagram blok optimisasi menggunakan <i>genetic algorithm</i> [22]	21
Gambar 2.7	Diagram Blok <i>Duelist Algorithm</i> [23]	22
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	23
Gambar 3.2	Segmentasi model CO ₂ <i>foam flood operation</i>	26
Gambar 4.1	Grafik Tekanan CO ₂ Terhadap Kedalaman pada <i>Injection well</i> dengan laju aliran massa injeksi 0.3044 kg/s, tekanan injeksi 1071 psi, temperatur 31 °C	34
Gambar 4.2	Grafik Temperatur CO ₂ Terhadap Kedalaman pada <i>Injection well</i> dengan laju aliran massa injeksi 0.3044 kg/s, tekanan injeksi 1071 psi dan temperatur 31°C	35
Gambar 4.3	Grafik Tekanan CO ₂ dan Minyak pada <i>Reservoir</i> dengan laju aliran massa injeksi 0.3044 kg/s, tekanan injeksi 1071, temperatur 31°C	37
Gambar 4.4	Grafik Temperatur CO ₂ dan minyak pada <i>Reservoir</i> dengan laju aliran massa injeksi 0.3044 kg/s, tekanan injeksi 1071, temperatur 31°C	37
Gambar 4.5	Grafik Tekanan Campuran CO ₂ dan Minyak Terhadap Kedalaman pada <i>Production Well</i> dengan laju aliran massa injeksi 0.3044 kg/s, tekanan injeksi 1071 psi, temperatur 31°C	39
Gambar 4.6	Grafik Temperatur Fluida Campuran Terhadap Kedalaman pada <i>Production Well</i> dengan laju aliran massa injeksi 0.3044 kg/s, tekanan injeksi 1071 psi, temperatur 31°C	39
Gambar 4.7	Grafik analisis sensitivitas perubahan laju aliran massa CO ₂ dan surfaktan terhadap profit	42

Gambar 4.8	Grafik analisis sensitivitas perubahan tekanan injeksi CO ₂ dan surfaktan terhadap profit	43
Gambar 4.9	Grafik sensitivitas perubahan temperatur injeksi CO ₂ dan surfaktan terhadap profit.....	43
Gambar 4.10	Grafik sensitivitas perubahan konsentrasi injeksi surfaktan terhadap profit	44
Gambar 4.11	Plot <i>fitness</i> terbaik setiap generasi GA.....	47
Gambar 4.12	Grafik Tekanan Injeksi CO ₂ -foam terhadap kedalaman pada <i>injection well</i> setelah dilakukan optimisasi	48
Gambar 4.13	Grafik Temperatur Injeksi CO ₂ -foam terhadap kedalaman pada <i>injection well</i> setelah dilakukan optimisasi	48
Gambar 4.14	Grafik Tekanan CO ₂ -foam terhadap kedalaman pada <i>reservoir</i> setelah dilakukan optimisasi	49
Gambar 4.15	Grafik Temperatur CO ₂ -foam terhadap kedalaman pada <i>injection well</i> setelah dilakukan optimisasi..	49
Gambar 4.16	Grafik Tekanan CO ₂ -foam pada <i>production well</i> setelah dilakukan optimisasi.....	50
Gambar 4.17	Grafik Temperatur CO ₂ -foam pada <i>production well</i> setelah dilakukan optimisasi.....	50

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Parameter input untuk pemodelan tekanan.....	33
Tabel 4.2 Parameter Input Pemodelan Tekanan dan Temperatur pada <i>Reservoir</i>	36
Tabel 4.3 Perhitungan Profit CO ₂ -foam EOR.....	41
Tabel 4.4 Parameter Optimal pada kondisi operasi CO ₂ -foam flood	46
Tabel 4.5 Perhitungan Profit CO ₂ -foam EOR setelah dioptimisasi dengan GA.....	46
Tabel 4.6 Perhitungan Profit CO ₂ -foam EOR setelah dioptimisasi dengan DA.....	46
Tabel 4.7 Hasil Profit CO ₂ -foam EOR setelah dioptimisasi	47

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Enhanced Oil Recovery (EOR) adalah teknik yang paling banyak digunakan pada operasi ladang minyak saat ini [1]. Terdapat tiga tingkatan metode eksplorasi minyak bergantung pada fase dari *reservoir* yang terdiri dari fase primer, sekunder dan tersier [2]. Pada fase primer, dorongan minyak dari dalam *reservoir* terjadi karena terdapat perbedaan tekanan yang sangat besar di dalam sumur dan di permukaan. Tekanan dari dalam sumur semakin lama akan semakin berkurang, sehingga produksi minyak akan berkurang, untuk mempertahankan produksi minyak pada fase sekunder biasanya dengan menggunakan injeksi air (*waterflooding*) dan injeksi ulang natural gas [1]. Pada fase tersier, peningkatan produksi minyak dilakukan dengan cara *Enhanced Oil Recovery* (EOR). EOR adalah metode *recovery* minyak dengan cara menginjeksikan fluida atau energi ke dalam *reservoir* untuk meningkatkan mobilitas minyak di dalam *reservoir*. Secara umum EOR dibagi menjadi tiga kategori utama yaitu *thermal recovery*, *chemical flooding* dan *miscible flooding* [3].

Proses injeksi gas ke dalam *reservoir* dengan menggunakan gas seperti CO₂, nitrogen, *flue gas* dan *hydrocarbon gas* termasuk ke dalam kategori *miscible flooding*. Gas yang digunakan akan larut dalam minyak sehingga mengurangi viskositas dan meningkatkan *miscibility* minyak. Injeksi gas menggunakan CO₂ memiliki kelebihan dibandingkan metode lain, yakni CO₂ larut dalam minyak, dan pada saat yang bersamaan komponen minyak beralih ke fase yang kaya akan kandungan CO₂ dan campuran yang dihasilkan dapat memindahkan minyak lebih efisien di dalam *reservoir* [4]. Injeksi gas CO₂ ini dapat dikombinasikan dengan *foam* [3]. Penggunaan *foam* dapat menurunkan mobilitas gas dengan cara mengurangi perpindahan gas dengan membuat lebih banyak hambatan terhadap aliran gas yang disebabkan oleh gelembung gas yang bercampur dengan *foam* dikelilingi oleh lapisan tipis cair yang disebut *lamella*. Sebagian gas terjebak oleh

lamella dan menjadi terperangkap, sehingga mengurangi permeabilitas relatif gas. Dengan turunnya permeabilitas relatif gas, maka mobilitas gas juga akan menurun sehingga *sweep efficiency* akan meningkat [5].

Proses pembentukan *foam* dipengaruhi oleh metode injeksi, kecepatan aliran injeksi dan kualitas *foam*. Pada eksperimen, pembentukan *foam* didefinisikan sebagai terjadinya penurunan mobilitas gas selama aliran gas melalui *reservoir*. *Foam* yang digunakan pada *reservoir* untuk menurunkan mobilitas gas, harus stabil dalam waktu yang cukup lama untuk mendapatkan hasil *sweep efficiency* yang lebih baik. *Lifetime* dari *foam* bergantung pada kestabilan *lamella*, dimana kestabilan *lamella* dipengaruhi oleh konsentrasi surfaktan [6]. Jadi performansi dari *foam* ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti tipe dan konsentrasi surfaktan, *properties* batuan, interaksi antara *foam* dan minyak, salinitas *brine*, temperatur, *pressure*, dan *flow rate* [7]

Penginjeksian CO_2 -*foam* ini didapatkan melalui pendistribusian *Carbon dioxide Capture and Storage* (CCS) unit, dan surfaktan yang harus diproduksi dalam skala besar. Diperlukan biaya yang cukup besar untuk menggunakan teknologi ini, dari aspek investasi maupun operasional. Biaya operasional terdiri dari biaya pembelian dan penginjeksian CO_2 dan surfaktan yang bergantung pada konsentrasi surfaktan, komposisi gas, *properties* batuan, tekanan dan *flow rate* agar CO_2 *foam* yang diinjeksikan memenuhi kriteria *reservoir*. Oleh karena itu, perlu adanya optimisasi pada kondisi operasi untuk meningkatkan keuntungan produksi minyak mentah.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka rumusan masalah yang dapat diambil adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana memodelkan CO_2 *foam flood operation* dari *injection well*, *reservoir* hingga *production well*?
2. Bagaimana mengoptimalkan produksi *crude oil* pada CO_2 *foam flood operation enhanced oil recovery*?

1.3. Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Memodelkan *CO₂ foam flood operation* mulai dari *injection well* hingga *production well*.
2. Mengoptimalkan produksi *crude oil* pada *CO₂ foam flood operation enhanced oil recovery*.

1.4. Lingkup Kerja

Adapun lingkup kerja dalam penelitian ini adalah melakukan pemodelan pada *injection well* dan *production well* menggunakan persamaan Begg's-Brill, sementara pada *reservoir* menggunakan persamaan Darcy. Variabel yang dioptimisasi konsentrasi surfaktan, laju aliran, tekanan dan temperatur injeksi untuk meningkatkan keuntungan. Hasil pemodelan ini divalidasi menggunakan perangkat lunak PIPESIM dan COMSOL. Model dioptimisasi menggunakan teknik optimisasi *Genetic Algorithm* dan *Duelist Algorithm*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Mekanisme *Recovery* untuk *Crude Oil Reservoir*

Ketika *reservoir* baru digunakan untuk produksi, tekanan awal pada *reservoir* biasanya cukup tinggi untuk mengalirkan minyak ke permukaan melalui sumur produksi dengan energi alami *reservoir* yang sesuai dengan *water drive*, *gas-drive* atau drainase gravitasi. Namun, tekanan akan menurun disebabkan oleh produksi yang secara berkelanjutan atau tekanan awal *reservoir* tidak akan memadai untuk proses produksi. Teknik *artificial lift* seperti pompa *down-hole* dan *gas lift* diperlukan untuk mengurangi tekanan pada *bottomhole* dan mampu membantu produksi hidrokarbon. Fase penerapan dari dua metode seperti aliran alami dan *artificial lift* ini dikenal sebagai tahap *primary recovery* dari *reservoir*. Jika di rata-rata, sekitar 10% dari *original oil in place* terproduksi selama tahap *primary recovery* ini.

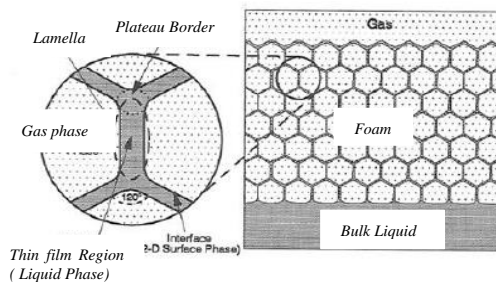
Tahap *secondary recovery* dimulai pada saat tekanan *reservoir* berkurang dan produksi minyak sudah tidak lagi ekonomis, dengan tujuan utama untuk *maintenance* tekanan di dalam *reservoir* untuk memindahkan minyak. Selama tahap ini, fluida berupa air atau gas diinjeksikan melalui sumur injeksi untuk meniru aliran alami yang terdapat di tempat seperti keadaan semula. *Waterflooding* dan injeksi gas adalah teknik yang banyak digunakan di tahap *secondary recovery*. Air dan/gas diinjeksikan ke dalam *reservoir* untuk mendorong minyak menuju ke sumur produksi. Tahap *secondary recovery* ini berhenti ketika produksi minyak menurun, dan fluida yang diinjeksikan tidak mampu lagi memproduksi minyak secara ekonomis lagi. Pada bagian akhir dari *secondary recovery*, faktor *recovery* minyak biasanya 15 dan 50%.

Untuk meningkatkan produksi minyak, tahap selanjutnya adalah *tertiary recovery* yang dapat digunakan untuk meningkatkan *sweep efficiency*. Tahap ini mengubah *properties* fluida dan/atau *properties* interaksi antara fluida dan batuan. Beberapa diantaranya terutama *thermal flooding* dan *miscible gas injection* adalah memodifikasi *properties* dari minyak. Terdapat

tiga kategori pada *tertiary recovery* ini yakni *thermal recovery*, *miscible flooding*, dan *chemical flooding*. Masing-masing metode melakukan yang terbaik jika diterapkan pada kondisi *reservoir* yang sesuai dengan metode tersebut. Kondisi ini melibatkan saturasi air dan minyak pada awal dari *tertiary recovery*, *properties* minyak (komposisi, API *gravity*, dan viskositas), temperatur *reservoir*, tekanan, ketebalan, kedalaman, porositas, permeabilitas tipe *reservoir* dan tipe batuan. *Tertiary recovery* ini disebut juga dengan *enhanced oil recovery* (EOR). [8]

2.2. Foam

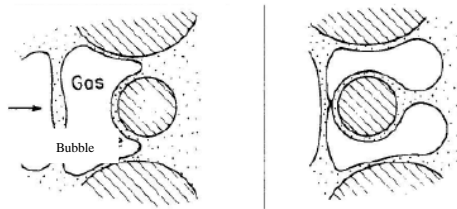
Foam dapat didefinisikan sebagai dispersi gas dalam liquid dimana gas sebagai fase yang diskontinyu (terdispersi) dan air sebagai fase kontinyu (media pendispersi) [7] *Foam* juga dapat dideskripsikan sebagai penggumpalan dari gelembung gas yang terpisah satu sama lain oleh selaput tipis cair yang disebut dengan lamella [6]. Gaya yang dibutuhkan untuk mempertahankan lamella disebut dengan “*disjoining pressure*”. *Disjoining pressure* ini merupakan kombinasi dari tiga gaya yakni, gaya van der Waals, adsorpsi dan gaya hidrasi [9]. Ketebalan *lamella* tergantung dari tekanan kapiler. Jika tekanan kapiler ditingkatkan ketebalan *lamella* akan berkurang hingga mencapai batas kritis ketebalannya (h^{cr}), yang akan membuat *lamella* pecah ketika tekanan kapiler terus diperbesar [6]. Gambar 2.2 menunjukkan sistem *foam* secara umum dalam 2D.



Gambar 2.1 *Foam* sistem secara umum [7]

Foam dapat dikarakterisasi berdasarkan kualitas, yang didefinisikan sebagai perbandingan atau rasio antara volume gas dan volume total antara gas dan air. Satuan dari kualitas *foam* ini adalah persentase (%). Kualitas *foam* yang rendah mengandung liquid yang lebih daripada kualitas *foam* yang lebih tinggi. Kualitas *foam* merupakan salah satu dari beberapa parameter yang mempengaruhi performansi *foam* dan perilaku dalam media berpori [10].

Mekanisme pembentukan *foam* membutuhkan pembentukan dari *lamella*. Pada dasarnya, terdapat tiga mekanisme dari pembentukan *lamella* yakni, *lamellae division*, *snap-off* dan *leave-behind*. *Lamellae division* terjadi karena pergerakan lamella masuk ke pori-pori batuan dan terjadinya pemisahan karena melewati pori-pori tersebut. Gambar 2.3 merupakan skema mekanisme *lamellae division*.



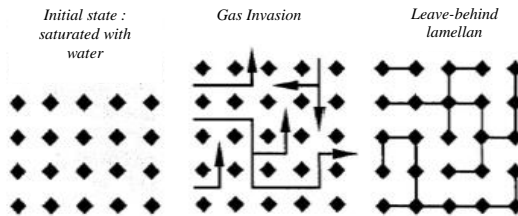
Gambar 2.2 Skema dari mekanisme *lamellae division* [6]

Mekanisme selanjutnya adalah *snap-off*, mekanisme ini terjadi karena berkumpulnya liquid di rongga yang sempit dalam media berpori, kemudian kumpulan liquid tersebut membuat seperti jembatan antar rongga sehingga terbentuklah antarmuka di dalam rongga. Gambar 2.4 menunjukkan skema mekanisme pembentukan lamella dengan *snap-off*



Gambar 2.3 Skema mekanisme *snap-off* [6]

Mekanisme terakhir dalam pembentukan lamella adalah *leave-behind*. Mekanisme ini membuat lamella dalam rongga antar pori-pori yang berdekatan ketika pori-pori yang berdekatan dimasuki oleh gas dari segala arah. Hal ini hanya muncul selama drainase. Gambar 2.5 berikut menunjukkan skema dari mekanisme *leave-behind* ini.

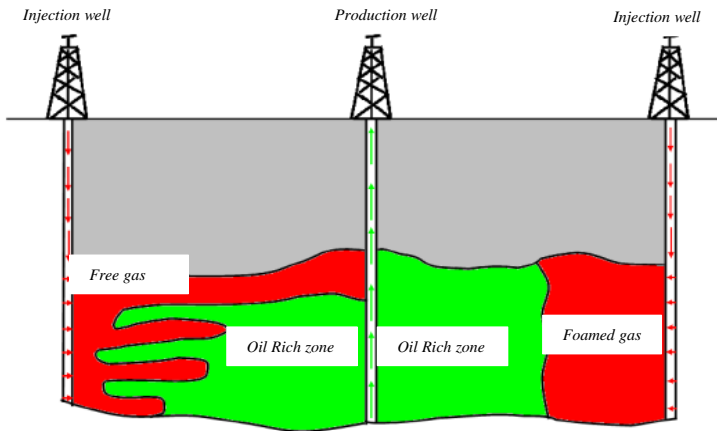


Gambar 2.4 Skema mekanisme *leave-behind* [6]

Ketika *foam* digunakan pada *reservoir* untuk mengurangi mobilitas gas, *foam* perlu stabil pada waktu yang cukup lama untuk menghasilkan efisiensi *recovery* yang lebih baik. *Lifetime* dari *foam* tergantung dari kestabilan tiap-tiap lamella, yang bergantung pada konsentrasi surfaktan, adsorpsi kinetik, drainase gravitasional, difusi gas yang melalui selaput tipis *foam*, tegangan permukaan, tekanan kapiler dan fluktuasi mekanik [11]. Sedangkan, tekanan kapiler merupakan fungsi dari temperature, salinitas dan morfologi batuan diantara faktor-faktor lain [12].

2.3. *Foam* sebagai metode *Enhanced Oil Recovery*

Foam sebagai metode *enhanced oil recovery* (EOR) secara umum terdapat dua tujuan utama yakni, penyumbatan dan kontrol pada mobilitas gas. Penyumbatan dilakukan di dekat *injection well* dan *production well* dan memiliki tujuan untuk meningkatkan *sweep efficiency* dengan cara menghalangi lapisan yang tidak produktif dan memiliki permeabilitas yang tinggi. Tujuan menggunakan *foam* untuk kontrol mobilitas adalah mengurangi mobilitas gas dengan meningkatkan viskositas dan permeabilitas relatif gas. Gambar 2.6 menunjukkan perbedaan antara injeksi dengan gas dan injeksi dengan *foam-gas*.



Gambar 2.5 Skema injeksi *foam-gas* dibandingkan dengan injeksi gas [13]

Foam sebagai metode EOR memiliki potensi yang tinggi, terutama pada *reservoir* berkarbonasi dimana banyak patahan dan batuan yang permeabilitasnya rendah. Meskipun terdapat potensi yang besar dan beberapa *field-test* menunjukkan hasil yang positif, metode ini masih belum banyak digunakan.

2.4. Permeabilitas

Permeabilitas adalah kemampuan media berpori untuk menghantarkan fluida. Darcy melakukan penelitian dan didapatkan hubungan sebagai berikut [14]

$$q = \frac{cA\Delta P}{L} \quad (2.1)$$

Dimana:

- q : Laju volumetrik aliran fluida (m^3/s)
- ΔP : Perbedaan tekanan dari titik awal hingga titik akhir (psi)
- A : Luas area yang dilalui fluida (m^2)

L : Panjang medium yang dilalui (m)

Nilai c didapatkan dari persamaan

$$c = \frac{k}{\mu} \quad (2.2)$$

Sehingga persamaan 2.1 dan 2.2 disubstitusi menjadi persamaan berikut.

$$q = \frac{kA\Delta P}{\mu L} \quad (2.3)$$

Dimana:

k : Nilai permeabilitas dari medium dengan dimensi cm^2

μ : Nilai viskositas fluida

Terdapat satuan yang dibuat untuk mengukur nilai permeabilitas yang biasanya dinamakan dengan Darcy, jadi nilai 1 Darcy setara dengan $9.869 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$. Dengan persamaan tersebut, nilai *pressure drop* pada *reservoir* bisa didapatkan.

2.5. Reynold Number

Reynold Number adalah bilangan tak berdimensi yang menunjukkan perbandingan antara gaya inersia dan gaya *viscous* pada suatu fluida. *Reynold Number* merupakan hasil dari percobaan yang ditemukan untuk menganalisis dinamika fluida. Pada *Reynold Number* yang besar, gaya inersia, yang sebanding dengan massa jenis dan kuadrat kecepatan fluida, relatif lebih besar terhadap gaya viskos, yang menyebabkan gaya viskos tidak mampu menahan fluktuasi acak dan cepat dari fluida. Pada *Reynold Number* yang kecil atau sedang, gaya viskos cukup besar untuk menekan fluktuasi ini, sehingga semakin besar nilai *Reynold Number* aliran fluida semakin *turbulent* begitu pula sebaliknya semakin kecil nilai *Reynold Number* maka aliran fluida semakin *laminar* [15].

Karakteristik aliran dapat diklasifikasikan berdasarkan nilai *Reynold Number*. Adapun klasifikasi karakteristik aliran adalah sebagai berikut:

- *Laminar flow*, merupakan aliran dengan nilai *reynold number* dibawah 2000
- *Turbulent flow*, merupakan aliran dengan nilai *reynold number* diatas 4000

Nilai *reynold number* bisa didapatkan dengan persamaan (2.4) [15].

$$N_{Re} = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya Viskos}} = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} = \frac{v \cdot d}{u} \quad (2.5)$$

Dimana:

N_{Re}	: <i>Reynold Number</i>
ρ	: Massa jenis (kg/m ³)
v	: Kecepatan aliran fluida (m/s)
d	: Diameter pipa (m)
μ	: Viskositas dinamik (kg/m.s)
u	: Viskositas kinematik (m ² /s)

2.6. Metode Begg's-Brill

Berdasarkan eksperimen, Beggs-Brill mendapatkan persamaan gradien tekanan pada aliran *single phase* dan *multiphase* dengan analisis kesetimbangan energi, dan mengasumsikan tidak ada gaya eksternal dari atau terhadap fluida alir.

$$\frac{dp}{dL} = \left(\frac{\partial p}{\partial L}\right)_{\text{gaya gesek}} + \left(\frac{\partial p}{\partial L}\right)_{\text{elevasi}} + \left(\frac{\partial p}{\partial L}\right)_{\text{akselerasi}} \quad (2.6)$$

Pressure Drop pada aliran *single-phase* dan *multi-phase* terjadi karena adanya gaya gesek, perbedaan elevasi atau perubahan energi potensial, dan akselerasi atau perubahan energi kinetik. Rugi akselerasi begitu kecil sehingga dapat diabaikan [16].

Rugi akibat gaya gesek pada aliran *single-phase* dan *multi-phase* terjadi karena adanya gesekan fluida dengan pipa. Rugi akibat gaya gesek pada *single-phase* dipengaruhi oleh pola aliran *laminar* dan *turbulent*, serta dipengaruhi oleh dinding pipa yang halus (*smooth wall*) dan dinding pipa kasar (*rough wall*) [16]. *Pressure drop* akibat gaya gesek dinyatakan dalam persamaan (2.7).

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{\text{gaya gesek}} = \frac{f_{tp} \cdot \rho \cdot v^2}{2 \cdot g_c \cdot d} \quad (2.7)$$

Dimana:

f_{tp}	: Faktor gesekan
ρ	: Massa jenis (kg/m ³)
v	: Kecepatan aliran fluida (m/s)
d	: Diameter pipa (m)
g_c	: Faktor gravitasi

Persamaan faktor gesekan untuk aliran *single phase* dengan aliran *turbulent* dan *rough wall pipeline* telah diusulkan oleh Jain dan dibandingkan tingkat akurasi dengan persamaan *Colebrook*. Jain menemukan bahwa untuk *range* dari *relative roughness* antara 10^{-6} dan 10^{-2} dan *range* dari *Reynolds number* antara 5×10^{-3} dan 10^8 memiliki *error* sebesar $\pm 1\%$ [16]. Faktor gesekan tersebut dinyatakan dalam persamaan (2.8).

$$\frac{1}{\sqrt{f_{tp}}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{\varepsilon}{d} + \frac{21.25}{N_{Re}^{0.9}} \right) \quad (2.8)$$

Dimana:

f_{tp}	: Faktor gesekan
N_{Re}	: <i>Reynold Number</i>
d	: Diameter pipa (m)
ε	: Kekasaran pipa

Sedangkan persamaan faktor gesekan untuk aliran *multi-phase* didapatkan dari nilai *holdup* pada kemiringan tertentu. Nilai *holdup* tersebut dapat diketahui dengan cara membandingkan nilai *holdup* pada kemiringan tertentu (θ), dengan kemiringan 0° . Sehingga *holdup* pada kemiringan tertentu dinyatakan dalam persamaan (2.9).

$$\frac{H_L(\theta)}{H_L(0)} = \psi \quad (2.9)$$

Dimana:

$H_L(\theta)$: *Holdup* pada kemiringan θ

$H_L(0)$: *Holdup* pada aliran horisontal

ψ = faktor koreksi inklinasi

Faktor koreksi inklinasi dapat diprediksi untuk seluruh kondisi aliran dengan persamaan berikut:

$$\psi = 1 + C(\sin \theta - 1/3 (\sin \theta)^3) \quad (2.10)$$

Dengan nilai $\theta = 1,8\theta$, pada kasus ini nilai θ adalah -90° karena aliran vertikal kebawah. Nilai koefisien C tergantung pada pola aliran sesuai analisis Beggs-Brill. Persamaan untuk menghitung fraksi *holdup* pada pola aliran *segregated*, *intermittent*, dan *distributed* dinyatakan dalam Persamaan (2.11), (2.12), dan (2.13). Persamaan untuk menghitung koefisien C pada pola aliran *segregated*, *intermittent*, dan *distributed* dinyatakan dalam Persamaan (2.14), (2.15), dan (2.16).

$$H_L(0) = \frac{0.98\lambda^{0.4846}}{N_{FR}^{0.0868}} \quad (2.11)$$

$$H_L(0) = \frac{0.84\lambda^{0.5351}}{N_{FR}^{0.0173}} \quad (2.12)$$

$$H_L(0) = \frac{1.06\lambda^{0.5824}}{N_{FR}^{0.0609}} \quad (2.13)$$

$$C = (1 - \lambda) \ln \left[\frac{4.7N_{LV}^{0.0868}}{\lambda^{0.3692}N_{FR}^{0.5056}} \right] \quad (2.14)$$

$$C = (1 - \lambda) \ln \left[\frac{4.7N_{LV}^{0.1244}}{\lambda^{0.3692}N_{FR}^{0.5056}} \right] \quad (2.15)$$

$$C = (1 - \lambda) \ln \left[\frac{4.7N_{LV}^{0.1244}}{\lambda^{0.3692}N_{FR}^{0.5056}} \right] \quad (2.16)$$

Pola aliran dapat diprediksi dengan melihat perbandingan bilangan Froude (N_{FR}) dengan konstanta pembatas L_1 dan L_2 dengan kriteria sebagai berikut:

- Jika $N_{FR} < L_1$ maka pola aliran *segregated*.
- Jika $N_{FR} > L_1$ dan $N_{FR} > L_2$ maka pola aliran adalah *distributed*.
- Jika $L_1 < N_{FR} < L_2$ maka pola aliran *intermittent*.

Dengan L_1 dan L_2 dinyatakan dalam Persamaan (2.17) dan (2.18):

$$L_1 = \exp(-4.62 - 3.757X - 0.481X^2 - 0.0207X^3) \quad (2.17)$$

$$L_2 = \exp(1.061 - 4.602X - 1.609X^2 - 0.179X^3 + 0.635 \times 10^{-3}X^5) \quad (2.18)$$

Dimana:

X : $\ln(\lambda)$

λ : *Input liquid content* = $q_L / (q_L + q_g)$

q_L : Laju volumetrik zat cair (m³/s)

q_g : Laju volumetrik zat gas (m³/s)

Beggs-Brill menggunakan faktor gesekan dua fase (f_{tp}) yang dinormalisasi dengan membagi dengan nilai asumsi tanpa slip yang berlaku apabila fluida mengalir pada kecepatan yang sama. Faktor koreksi tanpa slip diperoleh dari diagram Moody atau untuk pipa yang halus diperoleh dari Persamaan (2.19):

$$f_{ns} = \left[2 \log \left(\frac{N_{Re}}{4.5223 \log(N_{Re} - 3.8215)} \right) \right]^{-2} \quad (2.19)$$

Persamaan untuk mendapatkan faktor gesekan dua fase adalah

$$\frac{f_{tp}}{f_{ns}} = e^S \quad (2.20)$$

Dengan nilai S diperoleh dari:

$$S = \frac{\ln y}{-0.0523 + 3.182 \ln y - 0.8725 (\ln y)^2 + 0.01853 (\ln y)^4} \quad (2.21)$$

$$y = \frac{\lambda}{[H_L(\theta)]^2} \quad (2.22)$$

Untuk nilai interval $1 < y < 1.2$ nilai S dapat ditentukan dengan persamaan:

$$S = \ln(2.2y - 1.2) \quad (2.23)$$

Rugi elevasi adalah berkurangnya tekanan fluida dikarenakan fluida kehilangan tekanan hidrostatik dan dipengaruhi oleh densitas fluida serta tinggi kolom fluida. Rugi elevasi dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ini.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{elevasi} = \frac{g}{g_c} [\rho_L H_L + \rho_g (1 - H_L)] x \sin \theta \quad (2.24)$$

Pada penelitian ini, aliran yang digunakan adalah aliran pada pipa vertikal, sehingga sudut kemiringan θ adalah 90. Maka dengan mensubstitusi sudut kemiringan ke persamaan (2.24), total *pressure drop* dapat dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) = \frac{f_{tp} \cdot \rho \cdot v_m^2}{2 \cdot g_c \cdot d} + \frac{g}{g_c} [\rho_L H_L + \rho_g (1 - H_L)] x \sin \theta \quad (2.25)$$

Dimana:

- f_{tp} : Faktor gesekan
- ρ : Massa jenis campuran (kg/m^3)
- v_m : Kecepatan massa campuran (m/s)
- g_c : Faktor gravitasi
- d : Diameter pipa (m)
- g : Percepatan gravitasi (m/s^2)
- ρ_L : Massa jenis *liquid* (kg/m^3)
- ρ_g : Massa jenis gas (kg/m^3)
- H_L : Fraksi *holdup*
- θ : Sudut kemiringan dari horizontal

2.7. Porositas

Porositas merupakan salah satu karakteristik fisik dari batuan yang penting untuk diketahui dalam penelitian kali ini. Terdapat dua tipe porositas yang ada menurut T.D. Van Golf-Racht dalam bukunya. Tipe pertama biasanya disebut dengan porositas primer yakni ruang dalam batuan yang dibentuk oleh butiran batuan, porositas primer ini berupa *sandstone* atau *limestone*. Tipe kedua disebut porositas sekunder yakni ruang dalam batuan yang dibentuk oleh patahan batuan, sambungan dan pemisahan batuan oleh air yang bersirkulasi [17].

Porositas merupakan rasio ruang pori dibanding dengan keseluruhan volume pada formasi batuan [14].

$$\text{persen porositas} = \frac{\text{volume pori-pori}}{\text{volume keseluruhan batuan}} \times 100\% \quad (2.26)$$

Porositas ini dapat digunakan untuk mengetahui potensi kandungan minyak yang terdapat pada formasi batuan. Meskipun tidak semua kandungan minyak ada pada formasi batuan berpori-pori, akan tetapi potensi minyak bumi (*crude oil*) lebih besar, karena untuk mengandung minyak atau gas, batuan harus memiliki pori-pori yang saling terhubung agar minyak dan gas dapat bergerak melalui formasi batuan tersebut.

2.8. Pemodelan Transfer Panas pada *Injection* dan *Production Well*

Pada injeksi *CO₂ foam*, penambahan panas pada sistem per satuan Panjang, dQ/dZ memiliki nilai negatif karena hilangnya panas ke sekitar ketika temperatur fluida lebih besar daripada temperatur sekitar. Persamaan gradien hilangnya panas dapat ditunjukkan dengan persamaan (2.31)

$$\frac{dQ}{dZ} = 2\pi r_{to} U \times (T - T_h) \quad (2.31)$$

Dimana:

U : Koefisien total perpindahan panas (W/m²-K)

T : Temperatur fluida terhadap dZ (°C)

T_h : Temperatur batuan atau temperatur sekitar (°C)

2.9. Pemodelan Transfer Panas pada *Reservoir*

Perpindahan panas dari *CO₂ foam* ke reservoir menggunakan persamaan kesetimbangan perpindahan panas yang ditunjukkan pada persamaan (2.32) sebagai berikut: [18]

$$Q_1 = Q_2 + Q_{total \ losses} \quad (2.32)$$

Dimana:

Q_1 : Energi panas pada keadaan awal

Q_2 : Energi panas setelah melalui *reservoir*.

$Q_{total\ losses}$: Energi panas yang hilang selama proses dalam *reservoir*

Sementara itu, nilai energi Q_1 dan Q_2 didapatkan dari persamaan:

$$Q_1 = m_{CO_2-foam} C_{p1} T_1 \quad (2.33)$$

$$Q_2 = m_{CO_2-foam} C_{p2} T_2 \quad (2.34)$$

Dimana m adalah massa CO_2-foam , C_p adalah kalor spesifik pada tekanan (P) dan suhu (T) tertentu. Terdapat sejumlah energi yang hilang selama perambatan CO_2-foam dalam *reservoir* baik secara konduksi maupun konveksi. Energi yang hilang tersebut dapat diturunkan melalui persamaan berikut [18]:

$$Q_{total\ losses} = \frac{T_1 - T_\infty}{R_{konduksi} + R_{konveksi}} \quad (2.35)$$

Dimana:

T_1 : Temperatur fluida pada *reservoir* ($^{\circ}C$)

T_∞ : Temperatur *reservoir* ($^{\circ}C$)

$R_{konduksi}$: Resistansi thermal konduksi (m^2-K/W)

$R_{konveksi}$: Resistansi thermal konveksi (m^2-K/W)

Nilai R merupakan hambatan panas yang dapat dihitung dengan persamaan:

$$R_{konduksi} = \frac{L_p}{k A_p} \quad (2.36)$$

$$R_{konveksi} = \frac{1}{h A_p} \quad (2.37)$$

Dimana:

L_p : Panjang karakteristik *reservoir* (m)

k : Konduktivitas thermal *reservoir* (W/m-K)

A_p : Luas area *Reservoir* (m²)
 h : Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m²K)

Nilai h adalah koefisien perpindahan panas konveksi didapat dari persamaan *Nusselt Number* yang dilambangkan dengan Nu . *Nusselt Number* dapat diturunkan dari nilai *Reynold Number* (Re) dan *Prandalt Number* (Pr).

$$Nu = \frac{0.255}{\phi} Re^{2/3} Pr^{1/3} = \frac{h L_p}{k} \quad (2.38)$$

Dimana:

Nu : *Nusselt number*
 Re : *Reynold number*
 Pr : *Prandlt number*

2.10. Genetic Algorithm (GA)

Genetic algorithm (GA) merupakan jenis algoritma atau metode optimisasi yang digunakan untuk menemukan solusi paling optimal untuk menyelesaikan masalah komputasi.

GA menggambarkan salah satu cabang bidang ilmu yang dinamakan evolusi komputasi [19]. GA meniru proses biologi dari reproduksi dan seleksi alam untuk menyelesaikan solusi yang paling optimal [20]. Seperti dalam evolusi, proses dari GA ini adalah acak, namun teknik optimisasi ini memungkinkan seseorang untuk mengatur tingkat pengacakan.

Karena GA didesain untuk simulasi dalam proses biologi, banyak istilah-istilah yang berkaitan dibawa dari istilah biologi. Namun, bentuk dari istilah yang berkenaan dengan GA ini lebih mudah dibandingkan dengan istilah biologi [21]. Komponen-komponen dasar yang umum digunakan pada setiap GA adalah sebagai berikut.

1. *Fitness function* untuk optimisasi,
2. Populasi dari kromosom
3. *Crossover* untuk produksi kromosom generasi selanjutnya

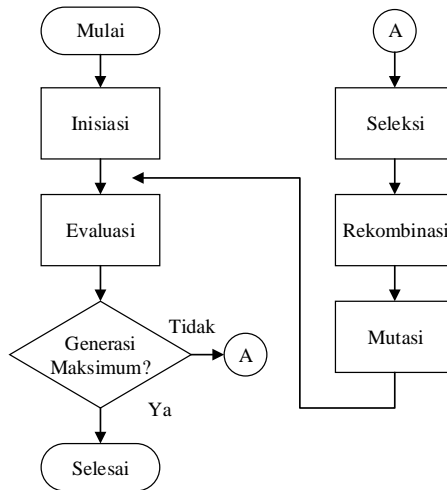
4. Mutasi acak dari kromosom digunakan untuk membentuk generasi baru.

Fitness function adalah fungsi yang akan dioptimisasi oleh GA. Istilah “*fitness*” diambil dari teori evolusi. Istilah tersebut disini digunakan karena adanya tes *fitness function* untuk menentukan seberapa “sesuai” solusi potensial yang diberikan. *Fitness function* merupakan salah satu bagian yang sangat penting dari algoritma.

Istilah kromosom mengarah pada nilai numerik atau nilai yang merepresentasikan solusi kandidat pada masalah yang akan diselesaikan oleh GA. Setiap kandidat solusi dikodekan sebagai susunan nilai parameter, sebuah proses yang juga ditemukan di algoritma optimisasi yang lain.

GA memulai prosesnya dengan kromosom-kromosom yang digolongkan secara acak sebagai generasi pertama atau populasi awal. Kemudian setiap kromosom dalam populasi dievaluasi oleh *fitness function* untuk tes seberapa baik masalah dapat terselesaikan. Selanjutnya, operator pemilih memilih beberapa kromosom untuk reproduksi berdasarkan pada probabilitas yang didefinisikan di awal. Semakin sesuai kromosomnya, kemungkinan terpilih sebagai solusi semakin besar.

Diagram alir optimisasi menggunakan GA dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Diagram blok optimisasi menggunakan *genetic algorithm* [22]

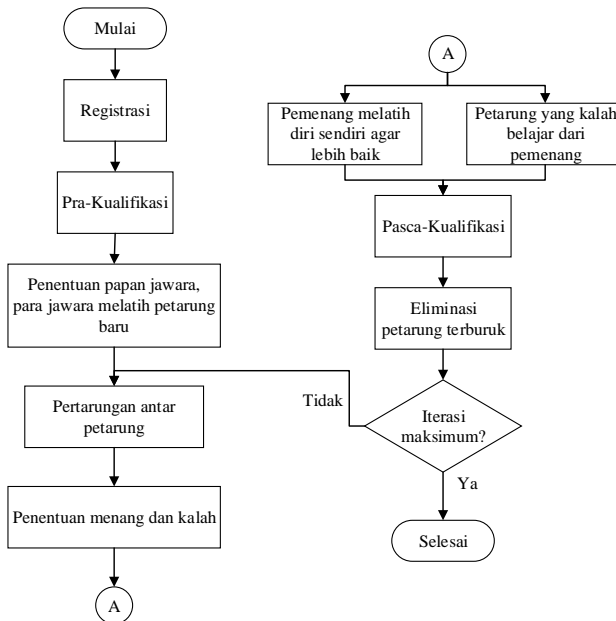
2.11. *Duelist Algorithm* (DA)

Duelist Algorithm (DA) merupakan metode optimisasi untuk menemukan solusi paling optimal dari suatu masalah komputasi yang terinspirasi dari kemampuan seorang petarung (*duelist*) dalam bertarung dan cara meningkatkan kemampuannya dalam bertarung dengan lawannya. Algoritma ini akan berjalan karena adanya populasi dari petarung, jadi jumlah petarung harus ditentukan di awal. Tujuan pertarungan ini adalah untuk menentukan pemenang dan yang kalah. Kemudian setiap petarung yang kalah akan belajar dari yang menang. Sementara itu, petarung yang menang akan melakukan inovasi keterampilan atau tekniknya agar dapat meningkatkan kemampuan bertarungnya. Beberapa petarung dengan kemampuan bertarung yang tinggi disebut sebagai jawara, tugas dari jawara adalah melatih petarung-petarung baru agar kemampuan bertarungnya sama dengan jawara. Namun, kemampuan bertarung dari jawara akan tetap. Kemudian, semua petarung dievaluasi kembali dan petarung dengan kemampuan

bertarung yang paling buruk akan dieliminasi untuk menjaga jumlah populasi dari petarung.

Dalam DA, semua individu akan bertarung satu lawan satu untuk menentukan jawara, pemenang dan yang kalah. Pertarungannya juga seperti pertarungan seperti dalam kehidupan nyata dimana yang lebih kuat tidak selalu menang, terdapat kesempatan yang lemah akan cukup beruntung untuk memenangkan pertarungan. Untuk meningkatkan kemampuan setiap petarung, terdapat dua cara pengembangan. Salah satunya merupakan inovasi yang hampir sama dengan mutasi pada GA. Perbedaannya terletak pada hanya pemenang yang mungkin untuk berinovasi. Cara pengembangan yang kedua biasa disebut dengan belajar, petarung yang kalah akan belajar dari pemenang [23]. Diagram blok DA ditunjukkan pada Gambar 2.9.

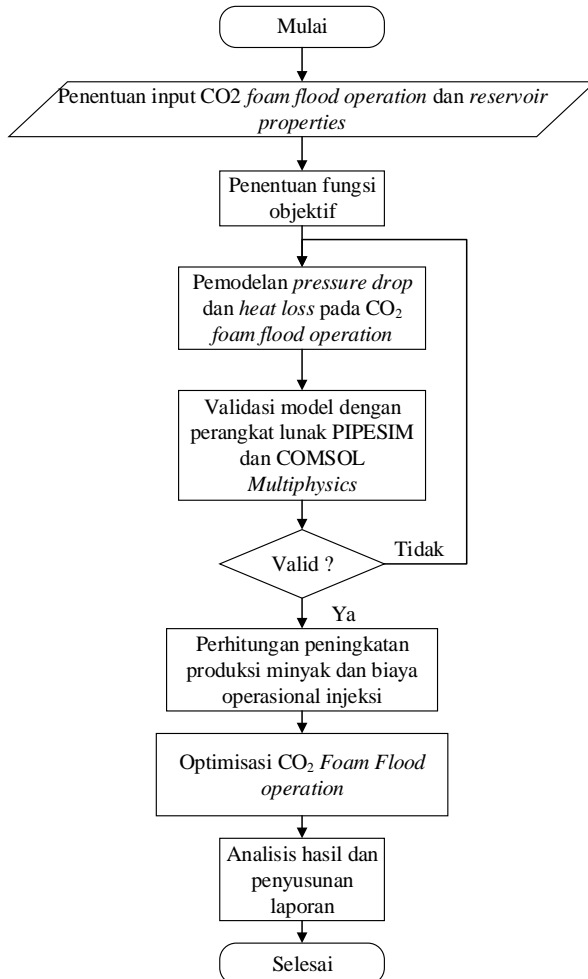
Terdapat beberapa langkah metode optimisasi sesuai dengan Gambar 2.9.



Gambar 2.7 Diagram blok *duelist algorithm* [23]

BAB III METODOLOGI

Adapun metodologi dalam melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.1. Penentuan Input CO₂ Foam Flood Operation dan Reservoir Formation Properties

Studi kasus kondisi CO₂-foam yang digunakan adalah menggunakan data dari Morrow Consolidated Oil Field. Kondisi laju injeksi sebesar 0.5 MMscf/day, kedalaman sumur 1067 m memiliki tekanan pada *reservoir* 1087psia, porositas formasi batuan 0.07 dan permeabilitas 18.1 mD. Ketebalan *reservoir* 10.4 m, dan jarak antara *injection well* dan *production well* sejauh 100 m. Bentuk reservoir diasumsikan berbentuk silinder, dengan tidak ada aliran fluida yang keluar atau masuk ke *control volume* (*reservoir*).

3.2. Penentuan Fungsi Objektif

Fungsi objektif dibutuhkan untuk mengetahui tujuan dari optimisasi yang akan dilakukan. Tujuan dari optimisasi CO₂ foam flood adalah memaksimalkan laju produksi minyak pada *production well* sehingga profit meningkat. Minyak yang dapat dihasilkan sebanding dengan jumlah CO₂ dan foam yang diinjeksikan pada tekanan tertentu. Sehingga biaya operasional pun akan meningkat. Selain itu diperlukan pula biaya untuk *recycling* CO₂ dan surfaktan yang terkandung bersama minyak pada hasil *production well* sebelum CO₂ dan surfaktan tersebut dapat digunakan kembali sebagai injeksi bahan terlarut pada *injection well*. Maka dari itu pemodelan keuntungan yang akan dimaksimalkan.

$$\begin{aligned}
 \text{Profit} &= \text{pendapatan minyak mentah} \\
 &\quad - \text{biaya pembelian CO}_2 \\
 &\quad - \text{biaya pembelian foam} \\
 &\quad - \text{biaya recycling CO}_2 \\
 &\quad - \text{biaya recycling foam} \\
 &\quad - \text{biaya operasional pompa}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

dengan masing-masing variabel tersebut didapatkan dari:

$$\text{Pendapatan} = \text{Laju produksi minyak} \times \text{Harga jual minyak} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Biaya pembelian CO}_2 & \\ &= \text{Volume CO}_2 \\ &\times \text{Biaya CO}_2 \text{ persatuan volume} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Biaya pembelian Surfaktan} & \\ &= \text{Volume Surfaktan} \\ &\times \text{Biaya Surfaktan persatuan massa} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Biaya recycling CO}_2 & \\ &= \text{Volume CO}_2 \\ &\times \text{Biaya CO}_2 \text{ persatuan volume} \end{aligned} \quad (3.4)$$

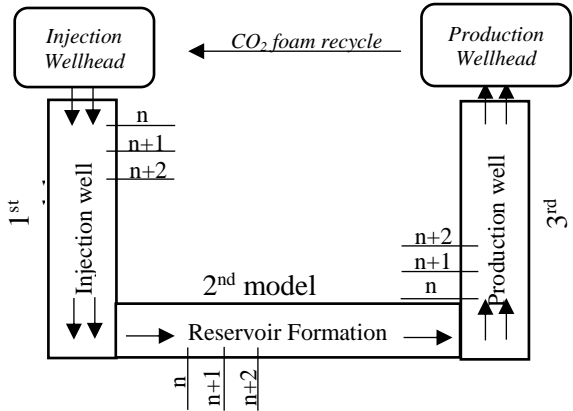
$$\begin{aligned} \text{Biaya recycling Surfaktan} & \\ &= \text{Volume Surfaktan} \\ &\times \text{Biaya Surfaktan persatuan volume} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Biaya Operasional Pompa} & \\ &= \text{Daya pompa} \times \text{Lama operasi} \\ &\times \text{Harga listrik} \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.3. Pemodelan CO₂ foam flood operation

CO₂ foam pada *reservoir* dimodelkan menjadi tiga bagian yaitu keadaan awal injeksi CO₂ foam pada *injection well*, keadaan kedua pada *reservoir formation*, serta keadaan akhir pada *production well*. CO₂ foam akan mengalami perubahan tekanan, temperatur dan sifat-sifat dari fluida karena hilangnya energi panas dan tekanan selama melalui proses. Karena perhitungan hilangnya panas dan tekanan membutuhkan properti fluida sedangkan tiap penambahan jarak pada tiap kondisi berubah maka panjang dari

CO₂ foam flood operation disegmentasi menjadi bagian-bagian kecil.



Gambar 3.2 Segmentasi model *CO₂ foam flood operation*

Segmentasi model *CO₂ foam flood operation* dilakukan seperti pada Gambar 3.2. dimana *injection well* disegmentasi sebanyak n . Panjang *injection well* dibagi menjadi bagian-bagian pendek, dengan demikian dalam perhitungan perubahan panas dan tekanan dapat dihitung dengan lebih akurat karena perubahan properti tiap penambahan jarak tidak diabaikan. Masukan keadaan kedua merupakan hasil akhir dari segmentasi pada bagian pertama, begitu juga pada masukan keadaan ketiga merupakan hasil akhir dari segmentasi pada bagian kedua. Keadaan awal saat injeksi *CO₂ foam* pada *injection well*, *reservoir formation* dan *production well* dimodelkan dengan persamaan berikut.

$$P_{akhir} = P_{awal} - \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (3.7)$$

$$T_{akhir} = T_{awal} - \sum_{i=1}^n \Delta T_i \quad (3.8)$$

Nilai ΔP_i didapatkan dari persamaan Beggs-Brill untuk *injection well* dan *production well* dan persamaan Darcy untuk di

bagian *reservoir formation*. Sedangkan nilai ΔT_i dapat dicari menggunakan perpindahan panas pada pipa dan pada media berpori. Dengan mengetahui nilai Q_{akhir} maka temperatur pada keadaan akhir dapat diketahui.

3.4. Validasi model dengan perangkat lunak PIPESIM dan COMSOL *Multiphysics*

Untuk mengetahui kebenaran model yang digunakan maka dilakukan validasi menggunakan perangkat lunak PIPESIM dan COMSOL *Multiphysics*. Hasil pemodelan pada *injection well* dan *production well* divalidasi dengan perangkat lunak PIPESIM karena cukup mensimulasikan fluida yang mengalir pada pipa. Sedangkan pada *reservoir* dibutuhkan validasi menggunakan perangkat lunak COMSOL *Multiphysics* untuk mensimulasikan reaksi yang terjadi pada media berpori.

3.5. Perhitungan peningkatan produksi minyak dan biaya operasional injeksi

Perhitungan estimasi jumlah produksi minyak yang dapat diproduksi dari CO_2 -foam yang akan digunakan untuk perhitungan laju produksi minyak menggunakan metode Koval dan OTA model yang didasarkan pada daerah yang berkontak dengan proses surfaktan pada reservoir [24], untuk memprediksi perolehan setelah CO_2 -foam yang diinjeksi.

Laju produksi minyak dihitung melalui nilai *additional recovery*, *cumulative production*, laju aliran massa. Selain itu, besarnya volume *original oil in place* atau banyaknya minyak yang terdapat dalam *reservoir* dipertimbangkan dalam proses perhitungan laju produksi minyak. Hasil perhitungan laju produksi minyak dapat diperoleh nilai pendapatan yang merupakan perkalian antara laju produksi minyak terhadap harga jual minyak.

$$P_t = V_{pd} \times P_o \quad (3.9)$$

$$V_{pd} = \frac{CP}{t} \quad (3.10)$$

$$t = \frac{V_{ROIP}}{q} \quad (3.11)$$

$$V_{ROIP} = V_R \times \emptyset \quad (3.12)$$

$$CP = N_p \times V_{ROIP} \quad (3.13)$$

$$N_p = \frac{\alpha + (F_i)_{BT}}{1 + \alpha} \quad (3.14)$$

$$(F_i)_{bt} = \sqrt{\frac{0.9}{(M + 1.1)}} \quad (3.15)$$

$$\alpha = \frac{1.6}{K^{0.61}} \left[\frac{F_i - (F_i)_{bt}}{1 - (F_i)_{bt}} \right]^{(\frac{1.28}{K^{0.26}})} \quad (3.16)$$

$$M = \frac{\mu_o}{\mu_s} \quad (3.17)$$

$$K = EHG \quad (3.18)$$

$$E = [0.78 + 0.22M^{1/4}]^4 \quad (3.19)$$

$$H = \left[\frac{V_{DP}}{(1 - V_{DP})^{0.2}} \right]^{10} \quad (3.20)$$

$$G = 0.565 \log \left(\frac{t_h}{t_v} \right) + 0.87 \quad (3.21)$$

$$\frac{t_h}{t_v} = 2.571 k_v A \frac{\Delta \rho}{q_{gross} \mu_s} \quad (3.22)$$

Dimana:

- P_t : Pendapatan (USD/hari)
- V_{pd} : Laju produksi minyak (bbl/hari)
- P_o : Harga jual minyak (USD/bbl)
- CP : *Cummulative production* (bbl)
- V_{ROIP} : *Volume residual oil in place* (bbl)
- V_R : *Volume reservoir* (bbl)
- \emptyset : Porositas *reservoir* (%)
- N_p : Fraksi minyak yang dapat *ter-recovery*
- $(F_i)_{bt}$: *HCPV of CO₂-foam injected at the point at which CO₂-foam reaches the production wells*
- F_i : *HCPV dari CO₂-foam yang diinjeksi*

- M : Rasio mobilitas dari 2 fluida
 K : Faktor *Koval*
 E : Faktor mobilitas *Koval*
 H : Faktor heterogentias *Permeability*
 G : Faktor segregasi *gravity*
 μ_o : Viskositas minyak (kg/m.s)
 μ_s : Viskositas CO_2 -foam (kg/m.s)
 V_{DP} : Koefisien *Dykstra-Parsons*
 k_v : Permeabilitas vertikal *reservoir* (m²)
 A : Luas penampang *reservoir* (m²)
 q_{gross} : Total laju injeksi dari CO_2 -foam (m³/s)

Untuk memprediksi perolehan jumlah *oil recovery* yang didapatkan dari injeksi surfaktan digunakan persamaan sebagai berikut.

$$N_{pc} = \frac{A_p \times h \times \phi \times E_{vm}}{B_o} \times (S_{orw} - S_{of}) \quad (3.23)$$

$$E_{vm} = \frac{\frac{N_p}{N} + \frac{B_{oi}}{B_o} - 1}{\frac{B_{oi}}{B_o} (1 - \frac{S_{orw}}{S_{oi}})} \quad (3.24)$$

$$B_o = 1 + \alpha(T_R - 60) \quad (3.25)$$

$$\alpha = 0.000288 + 8.04111 \times 10^{-6} API - 1.890 \times 10^{-7} (API)^2 \quad (3.26)$$

Dimana:

- N_{pc} : Minyak yang dipindahkan oleh surfaktan (STB)
 A_p : Luas penampang *reservoir* (m²)
 h : Ketebalan *reservoir* (m)
 ϕ : Porositas (%)
 E_{vm} : Fraksi volume *reservoir* yang berkontak dengan surfaktan

B_o	: Rasio volume minyak pada tekanan dan temperatur <i>reservoir</i> terhadap volume yang ter-recover
S_{orw}	: Saturasi minyak pada <i>reservoir</i> setelah <i>waterflooding</i>
S_{of}	: Saturasi minyak pada <i>reservoir</i> oleh <i>chemical flooding</i>
N_p	: Total <i>recovery</i> minyak pada fase sebelumnya (STB)
N	: Estimasi jumlah minyak awal pada <i>reservoir</i> (STB)
B_{oi}	: Rasio volume minyak awal yang terdapat pada <i>reservoir</i> terhadap volume minyak yang terproduksi
S_{oi}	: Saturasi minyak awal
T_R	: Temperatur <i>reservoir</i>
API	: Derajat API dari minyak

Untuk mendapatkan biaya pengadaan CO_2 *foam* maka didapatkan dari besar laju aliran massa CO_2 , harga CO_2 per volume dan juga besar laju aliran massa *foam* serta harga *foam* per volume

$$B_{CO_2-foam} = (\dot{V}_{CO_2} \times P_{CO_2}) + (V_{foam} \times P_{foam}) \quad (3.27)$$

Dimana:

B_{CO_2-foam}	: Biaya CO_2 - <i>foam</i> (USD/hari)
\dot{V}_{CO_2}	: Volume CO_2 per hari (bbl/hari)
P_{CO_2}	: Harga CO_2 (USD/bbl)
V_{foam}	: Volume <i>foam</i> per hari (bbl/hari)
P_{foam}	: Harga <i>foam</i> (USD/bbl)

Dalam penerapan CO_2 *foam EOR* perlu adanya *recycle* untuk memisahkan gas CO_2 dan *foam* dari fluida produksi yang dihasilkan selama proses CO_2 *foam EOR* sehingga perlu dipertimbangkan biaya *recycle*

$$B_R = (V_{CO_2} \times B_{CO_2}) + (V_{foam} \times B_{foam}) \quad (3.28)$$

Dimana:

B_R : Total biaya *Recycling* (USD/hari)

V_{CO_2} : Volume *recovery* CO_2 per hari (bbl/hari)

B_{CO_2} : Biaya *recycling* CO_2 (USD/bbl)

V_{foam} : Volume *recovery* *foam* per hari (bbl/hari)

B_{foam} : Biaya *recycling* *foam* (USD/bbl)

Biaya operasional pompa untuk CO_2 *foam* EOR dapat dihitung dari energi listrik yang digunakan pompa selama beroperasi. Biaya operasional pompa adalah hasil perkalian daya pompa dengan lama operasional pompa dan tariff dasar listrik per kWh.

$$W_p = \frac{q \times \Delta P}{\eta} \quad (3.29)$$

$$B_{OP} = W_p \times Y \times K \quad (3.30)$$

dimana:

W_p : Besar usaha pompa persatuan waktu/ daya pompa (Watt)

ΔP : *Pressure drop* (Pa)

q : Laju aliran massa fluida (m^3/s)

η : Efisiensi pompa (%)

B_{OP} : Biaya operasional pompa (USD/jam)

Y : Lama operasi pompa (jam)

K : Tarif dasar listrik (USD/kWh)

3.6. Optimisasi CO_2 *foam* flood operation

Untuk menentukan keadaan optimal CO_2 *foam* flood operation digunakan teknik optimisasi *genetic algorithm* dan *duelist algorithm*. Terdapat 4 variabel yang dioptimisaasi, yaitu laju aliran massa injeksi (\dot{m}), tekanan injeksi (P), temperatur (T) dan konsentrasi surfaktan. Hasil individu dengan fitness terbesar akan menjadi solusi yang menghasilkan nilai fungsi objektif yang maksimal.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pemodelan Tekanan dan Temperatur pada *Injection well* dengan Persamaan Begg's-Brill

Pemodelan tekanan pada *injection well* dilakukan dengan menggunakan kondisi input dari Morrow County, Ohio, USA. Kondisi input yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.1 [25].

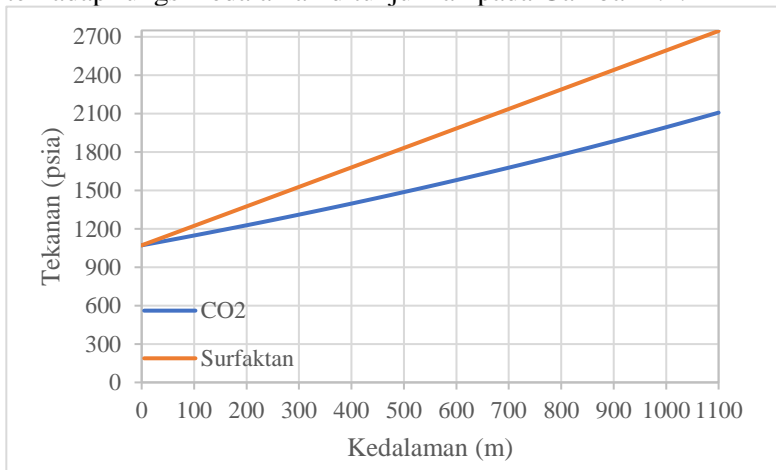
Tabel 4.1 Parameter input untuk pemodelan tekanan

Parameter	Nilai	Satuan
Gravitasi	9.8	m/s ²
Kedalaman sumur	1067.0	m
Tekanan injeksi CO ₂	1087.0	psia
Laju aliran massa injeksi CO ₂	0.5	MMscfd
Temperatur injeksi CO ₂	31.0	°C
Tekanan injeksi surfaktan	1087.0	psia
Laju aliran massa injeksi surfaktan	0.5	MMscfd
Temperatur injeksi surfaktan	31.0	°C
Konsentrasi surfaktan	0.5	wt%

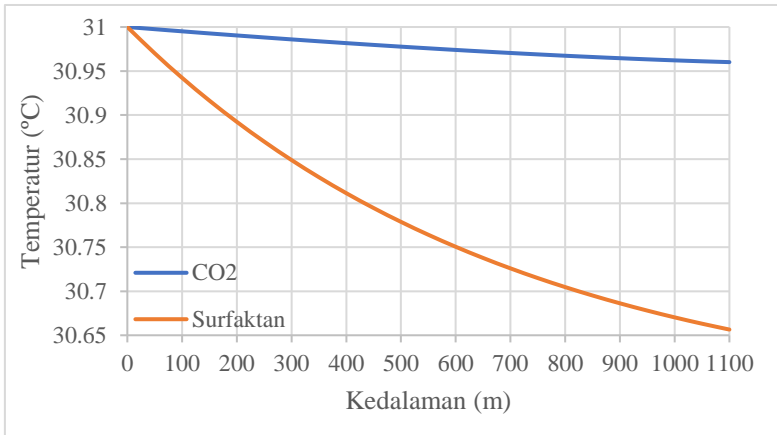
Pemodelan gradien tekanan dan temperatur pada *injection well* menggunakan persamaan Begg's-Brill telah divalidasi dengan perangkat lunak PIPESIM, didapatkan hasil rata-rata error untuk tekanan sebesar 0.375% dan temperatur sebesar 4.212%. Hasil validasi ditampilkan pada lampiran A.

Nilai *error* ini dikarenakan adanya perbedaan perhitungan *properties* pada *software* PIPESIM dan pemodelan dalam tugas akhir ini. Pada tugas akhir ini, perhitungan *properties* CO₂-foam menggunakan regresi *multivariable* dari tekanan, temperatur dan massa injeksi. Sehingga perhitungan *properties* pada tugas akhir ini dianggap linier, sementara itu pada *software* PIPESIM perhitungan *properties* CO₂-foam sesuai dengan keadaan sesungguhnya dimana *properties* CO₂-foam ini sebenarnya non-linier.

Hasil grafik gradien tekanan pada *injection well* dengan menggunakan persamaan Begg's-Brill dengan fungsi kedalaman ditunjukkan pada Gambar 4.1. Dan hasil grafik gradien temperatur terhadap fungsi kedalaman ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.1. Grafik tekanan CO₂ terhadap kedalaman pada *injection well* dengan laju aliran massa injeksi 0.3044 kg/s, tekanan injeksi 1071 psi, temperatur 31 °C



Gambar 4.2. Grafik temperatur CO₂ terhadap kedalaman pada *injection well* dengan laju aliran massa injeksi 0.3044 kg/s, tekanan injeksi 1071 psi dan temperatur 31°C

Pada Gambar 4.1 menunjukkan bahwa tekanan CO₂ dan surfaktan mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya kedalaman dari *injection well*. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya adalah perubahan elevasi karena kedalaman dari *injection well*. Selain itu, kenaikan tekanan juga disebabkan oleh rugi-rugi gesekan. Rugi-rugi gesekan ini disebabkan oleh gesekan yang terjadi antara CO₂ dan surfaktan yang mengalir pada dinding-dinding pipa yang memiliki tingkat kekasaran tertentu sehingga menyebabkan terjadinya perubahan tekanan [16].

Pada Gambar 4.2 menunjukkan bahwa temperatur CO₂ dan surfaktan mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kedalaman dari *injection well*. Hal ini disebabkan oleh perubahan panas yang terjadi karena adanya perpindahan panas antara CO₂ dan surfaktan dengan *reservoir*, ketika temperatur CO₂ dan surfaktan lebih besar daripada temperatur *reservoir* [16]. Temperatur CO₂, surfaktan dan temperatur *reservoir* ditunjukkan pada Tabel 4.1.

4.2. Hasil Pemodelan Tekanan dan Temperatur pada Reservoir dengan Persamaan Darcy

Pemodelan tekanan dan temperatur pada *reservoir* dilakukan dengan menggunakan parameter input dari Morrow County, Ohio, USA. Parameter-parameter yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.2.

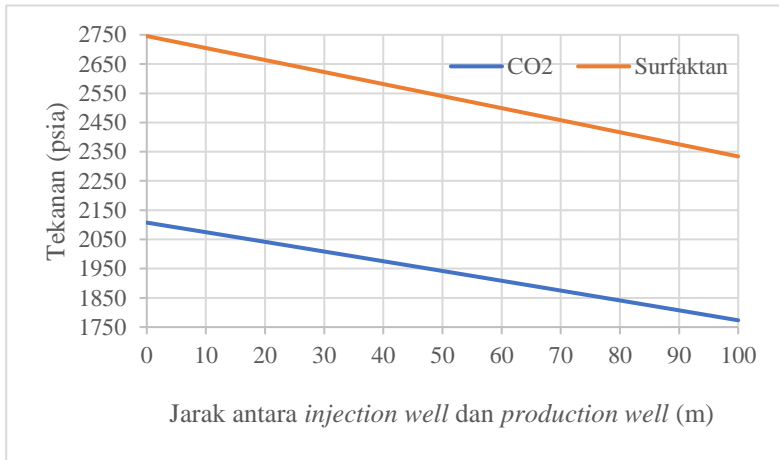
Tabel 4.2. Parameter input pemodelan tekanan dan temperatur pada *reservoir*

Parameter	Nilai	Satuan
Jarak <i>injection well</i> hingga <i>production well</i>	100.00	m
Tekanan <i>reservoir</i>	1087.00	Psia
Temperatur <i>reservoir</i>	30.56	°C
Permeabilitas batuan	18.10	mD
Porositas batuan	0.07	-
°API	41.00	°API

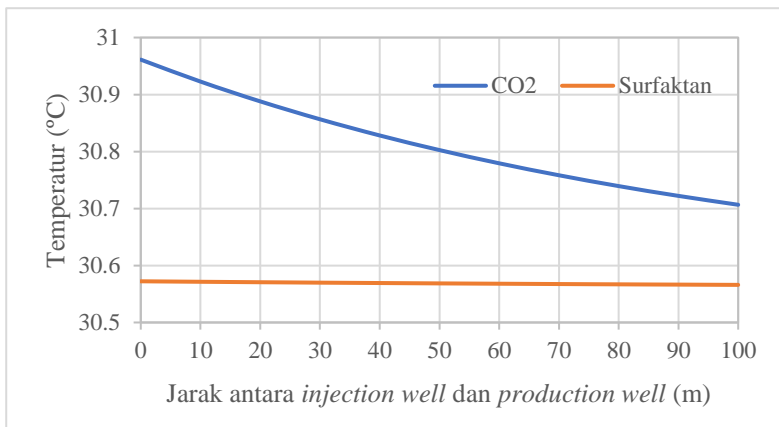
Pemodelan gradien tekanan dan temperatur pada *reservoir* menggunakan persamaan Darcy telah divalidasi dengan menggunakan perangkat lunak COMSOL *Multiphysics* didapatkan hasil rata-rata *error* untuk tekanan sebesar 0.22% dan untuk temperatur sebesar 2.612%. Hasil validasi ditampilkan pada lampiran B. *Error* ini diakibatkan oleh perbedaan perhitungan *properties* dari CO₂ dan surfaktan pada tugas akhir ini dengan perhitungan yang dilakukan oleh perangkat lunak COMSOL *Multiphysics*. Perbedaan perhitungan *properties* ini akan memengaruhi perhitungan tekanan dan temperatur sehingga terdapat selisih hasil perhitungan atau *error* pada pemodelan dan perangkat lunak COMSOL *Multiphysics*.

Parameter input fluida dalam pemodelan tekanan dan temperatur ini, merupakan parameter output dari fluida pada *injection well*. Hasil grafik gradien tekanan pada *reservoir* terhadap

panjang *reservoir* ditunjukkan pada Gambar 4.3. Dan hasil grafik gradien temperatur ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.3 Grafik tekanan CO₂ dan minyak pada *reservoir* dengan laju aliran massa injeksi 0.3044 kg/s, tekanan injeksi 1071, temperatur 31°C



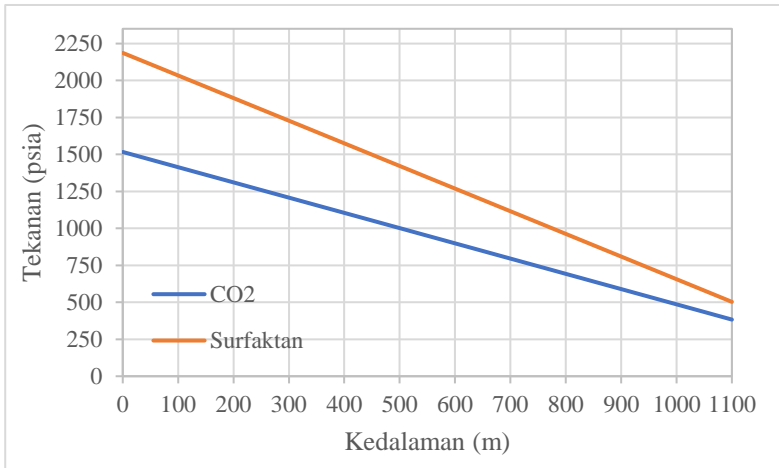
Gambar 4.4 Grafik temperatur CO₂ dan minyak pada *reservoir* dengan laju aliran massa injeksi 0.3044 kg/s, tekanan injeksi 1071, temperatur 31°C

Pada Gambar 4.3 menunjukkan bahwa tekanan CO₂ dan surfaktan mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya panjang dari *reservoir*. Hal ini terjadi karena selama melewati *reservoir*, tekanan fluida akan mengalami penurunan karena melewati media berpori.

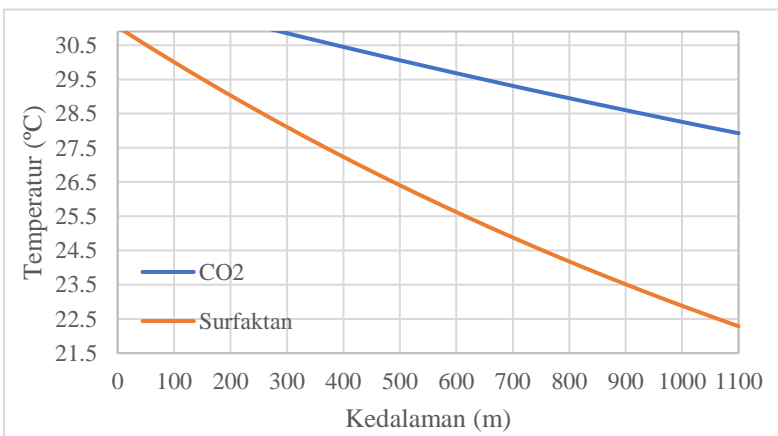
Pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa temperatur CO₂ dan surfaktan mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya panjang dari *reservoir*. Hal ini disebabkan oleh perubahan panas yang terjadi karena perpindahan panas antara CO₂ dan surfaktan dengan *reservoir*, ketika temperatur CO₂ dan surfaktan lebih besar daripada temperatur *reservoir*.

4.3. Hasil Pemodelan Tekanan dan Temperatur pada *Production Well* dengan Metode Begg's-Brill

Tekanan dan temperatur dari hasil pemodelan dengan metode Darcy pada *reservoir*, digunakan sebagai parameter input untuk pemodelan pada *production well*. Hasil pemodelan tekanan dan temperatur pada *production well* telah divalidasi dengan perangkat lunak PIPESIM. Pada tekanan didapatkan rata-rata *error* sebesar 0.385%, sedangkan temperatur didapatkan rata-rata *error* sebesar 2.782%. Hasil validasi ditampilkan pada lampiran C. Hasil pemodelan tekanan ditunjukkan pada Gambar 4.5 dan hasil pemodelan temperatur ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.5 Grafik tekanan campuran CO₂ dan minyak terhadap kedalaman pada *production well* dengan laju aliran massa injeksi 0.3044 kg/s, tekanan injeksi 1071 psi, temperatur 31°C



Gambar 4.6 Grafik temperatur fluida campuran terhadap kedalaman pada *production well* dengan laju aliran massa injeksi 0.3044 kg/s, tekanan injeksi 1071 psi, temperatur 31°C

Pada Gambar 4.5 menunjukkan bahwa tekanan fluida mengalami penurunan seiring dengan berkurangnya kedalaman dari *production well*. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya adalah perubahan elevasi karena kedalaman dari *production well*. Sudut elevasi dari *production well* bernilai positif karena dianggap setelah dari *reservoir*, fluida akan terangkat secara horizontal ke atas, sehingga menyebabkan tekanan hidrostatik berkurang pada arah aliran fluida campuran. Selain itu, penurunan tekanan juga disebabkan oleh rugi-rugi gesekan. Rugi-rugi gesekan ini disebabkan oleh gesekan yang terjadi antara fluida yang mengalir dengan dinding-dinding pipa yang memiliki tingkat kekasaran tertentu sehingga menyebabkan terjadinya perubahan tekanan.

Pada Gambar 4.6 menunjukkan bahwa temperatur fluida juga mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh perubahan panas yang terjadi karena perpindahan panas antara CO_2 -foam dan minyak dengan lingkungan, ketika temperatur CO_2 -foam dan minyak lebih tinggi daripada temperatur lingkungan [16].

4.4. Hasil Perhitungan *Oil Recovery* dan Biaya Operasional

Oil recovery merupakan jumlah *crude oil* yang terproduksi setelah penginjeksian CO_2 dan surfaktan ke dalam *reservoir*. Berdasarkan kondisi input yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 diperoleh nilai laju produksi *crude oil* sebesar 384.89 barrel per hari.

Pendapatan merupakan hasil penjualan minyak per hari, dan dinyatakan dalam persamaan (3.8). Dengan laju produksi minyak 384.89 barrel per hari, dan harga jual minyak yang digunakan sebagai acuan adalah harga minyak mentah jenis *West Texas Intermediate* (WTI) pada jangka 15 April 2018 hingga Mei 2018, yakni 67.33 USD/bbl, maka didapatkan nilai pendapatan sebesar 26028.4195 USD/hari.

Volume CO_2 -foam yang terbawa ke *production line* diasumsikan sama dengan volume CO_2 -foam yang diinjeksikan pada *injection well*. Volume CO_2 dan surfaktan yang diinjeksikan dengan kondisi input sesuai pada Tabel 4.1 adalah masing-masing

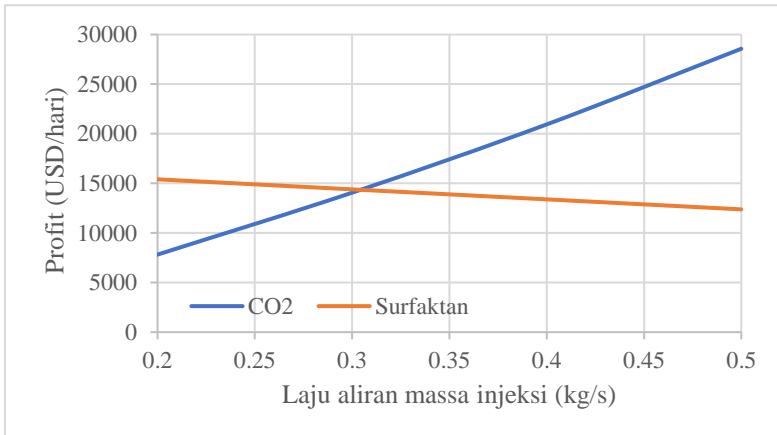
0.5 MMscfd. Biaya pengadaan CO₂-foam dihitung menggunakan persamaan (3.27) dan diperoleh biaya sebesar 10895.73 USD/hari. Biaya pengolahan CO₂-foam dihitung menggunakan persamaan (3.28), sehingga didapatkan biaya sebesar 773.16 USD/hari. Sedangkan biaya operasional kompresor dapat dihitung menggunakan persamaan (3.29) dan (3.30), sehingga didapatkan biaya operasional pompa sebesar 9.38 USD/hari. Perhitungan nilai profit merupakan total pendapatan dikurangi dengan biaya pengadaan CO₂-foam, biaya *recycling* CO₂-foam dan biaya operasional pompa pada kondisi operasi parameter input sesuai dengan Tabel 4.1, dan didapatkan hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Perhitungan profit CO₂-foam EOR

Parameter	Nilai	Satuan
Pendapatan	26028.4195	USD/hari
Biaya CO ₂ -foam	10895.7255	USD/hari
Biaya <i>recycling</i> CO ₂ -foam	773.1596	USD/hari
Biaya Operasional Pompa	9.3823	USD/hari
Profit	14350.1522	USD/hari

4.5. Analisis Sensitivitas

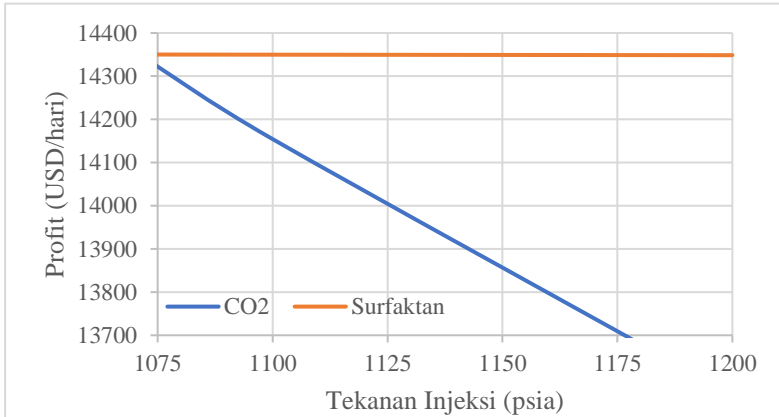
Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan salah satu dari variabel yang dioptimisasi terhadap estimasi nilai profit yang akan didapatkan. Pada Gambar 4.7 menampilkan grafik analisis sensitivitas perubahan laju aliran massa injeksi terhadap profit dengan tekanan, temperatur dan konsentrasi surfaktan tetap. Grafik tersebut menunjukkan peningkatan laju aliran massa untuk CO₂ diikuti oleh kenaikan profit, sedangkan untuk surfaktan terjadi penurunan profit.



Gambar 4.7 Grafik analisis sensitivitas perubahan laju aliran massa CO₂ dan surfaktan terhadap profit

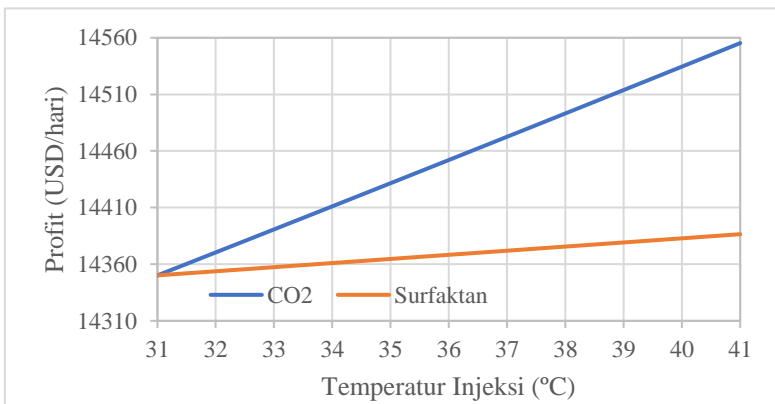
Penurunan profit pada setiap kenaikan laju aliran massa surfaktan terjadi karena harga pembelian surfaktan yang mahal, meskipun massa injeksi mempengaruhi penambahan *recovery* minyak.

Analisis sensitivitas untuk tekanan injeksi CO₂ dan surfaktan sebagai variabel terhadap profit dengan laju aliran massa, temperatur dan konsentrasi surfaktan yang konstan ditunjukkan pada Gambar 4.8. Pada grafik tersebut terlihat bahwa kenaikan tekanan injeksi akan menurunkan profit yang didapatkan. Pada surfaktan, kenaikan tekanan injeksi memberikan pengaruh penurunan profit yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan CO₂.



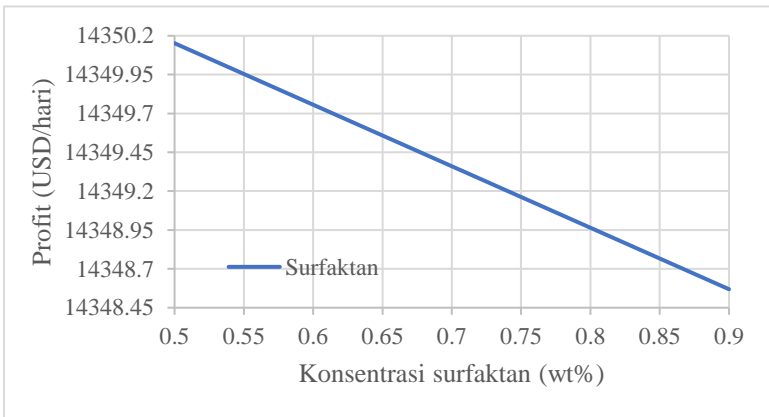
Gambar 4.8 Grafik analisis sensitivitas perubahan tekanan injeksi CO₂ dan surfaktan terhadap profit

Analisis sensitivitas untuk temperatur injeksi CO₂ dan surfaktan sebagai variabel terhadap profit dengan laju aliran massa, tekanan dan konsentrasi surfaktan yang konstan ditunjukkan pada Gambar 4.9. Pada grafik tersebut terlihat bahwa kenaikan nilai temperatur injeksi akan meningkatkan profit yang didapatkan.



Gambar 4.9 Grafik sensitivitas perubahan temperatur injeksi CO₂ dan surfaktan terhadap profit

Analisis sensitivitas selanjutnya dilakukan dengan perubahan pada konsentrasi injeksi surfaktan dengan laju aliran massa, temperatur dan tekanan injeksi yang tetap terhadap profit yang ditunjukkan pada Gambar 4.10. Grafik tersebut menunjukkan bahwa kenaikan nilai dari konsentrasi injeksi surfaktan akan menurunkan profit yang didapat.



Gambar 4.10 Grafik sensitivitas perubahan konsentrasi injeksi surfaktan terhadap profit

Dari beberapa grafik tersebut, laju aliran massa injeksi merupakan variabel optimisasi yang lebih sensitif dibandingkan dengan variabel temperatur injeksi, tekanan injeksi dan konsentrasi injeksi, karena perubahan laju aliran massa injeksi memberikan perubahan volume injeksi yang lebih banyak, semakin banyak volume injeksi maka produksi minyak akan lebih tinggi dan biaya pengadaan akan semakin besar.

Variabel optimisasi yang lain juga dapat memengaruhi profit seiring bertambahnya nilai dari variabel-variabel tersebut. Seperti pada tekanan injeksi dan konsentrasi surfaktan. Pada tekanan injeksi terjadi karena meningkatnya tekanan injeksi CO_2 dan surfaktan akan menambah biaya operasional pompa sehingga dapat menurunkan profit. Pada konsentrasi surfaktan, semakin banyak konsentrasi surfaktan yang dibutuhkan akan menurunkan profit, hal ini disebabkan oleh semakin tinggi nilai konsentrasi maka akan

semakin banyak massa yang diinjeksikan, semakin banyak massa yang diinjeksikan maka semakin tinggi biaya yang diperlukan. Hal lain yang perlu diperhatikan adalah *driving force* atau penggerak dari aliran fluida CO₂ dan surfaktan adalah tekanan, hal tersebut menyebabkan laju aliran massa yang besar membutuhkan tekanan yang besar pula. Sedangkan dalam analisis sensitivitas, laju aliran massa injeksi dan tekanan injeksi mengakibatkan kenaikan dan penurunan profit. Sehingga untuk mendapatkan profit yang maksimal maka dibutuhkan kombinasi laju aliran massa injeksi, tekanan injeksi, temperatur injeksi dan konsentrasi injeksi surfaktan yang optimum.

4.6. Optimisasi CO₂-Foam Flood Operation

Fungsi objektif dari optimisasi ini adalah profit, yang merupakan jumlah dari pendapatan dari penjualan minyak dikurangi biaya pembelian CO₂ dan surfaktan, biaya *recycling* dan biaya operasional pompa. Variabel yang dioptimisasi adalah laju aliran massa injeksi, tekanan injeksi, temperatur injeksi dan konsentrasi surfaktan. Teknik optimisasi *stochastics algorithms* yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah GA dan DA. Berdasarkan hasil optimisasi diperoleh hasil terbaik dari setiap jenis teknik optimisasi dapat dilihat pada Tabel 4.4 untuk hasil variabel yang yang dioptimisasi.

Hasil perhitungan pendapatan, biaya pengadaan CO₂ dan surfaktan, biaya *recycling*, biaya operasional pompa dan profit pada setiap teknik optimisasi berdasarkan hasil variabel yang dioptimisasi dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan 4.6.

Tabel 4.4 Variabel-variabel optimal pada kondisi operasi CO₂-*foam flood*

Variabel yang dioptimisasi	Teknik Optimisasi	
	GA	DA
Tekanan Injeksi CO ₂	1071.043797	1095.6142
Tekanan Injeksi Surfaktan	1120.209888	1172.4948
Laju aliran massa CO ₂	0.450486	0.4348
Laju aliran massa Surfaktan	0.304445	0.3290
Temperatur Injeksi CO ₂	40.990215	37.3626
Temperatur Injeksi Surfaktan	39.931673	31.1168
Konsentrasi Surfaktan	0.700899	0.7414

Tabel 4.5 Perhitungan profit CO₂-*foam EOR* setelah dioptimisasi dengan GA

Parameter	Nilai	Satuan
Pendapatan	38095.00	USD/hari
Biaya CO ₂ dan Surfaktan	10974.00	USD/hari
Biaya <i>Recycling</i>	1131.60	USD/hari
Biaya Operasional Pompa	11.26	USD/hari
Profit	25978.15	USD/hari

Tabel 4.6 Perhitungan profit CO₂-*foam EOR* setelah dioptimisasi dengan DA

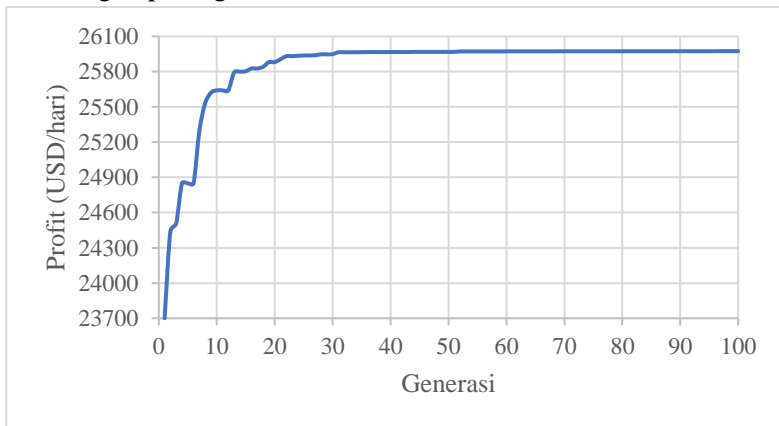
Parameter	Nilai	Satuan
Pendapatan	32565.00	USD/hari
Biaya CO ₂ dan Surfaktan	14886.00	USD/hari
Biaya <i>Recycling</i>	967.32	USD/hari
Biaya Operasional Pompa	13.55	USD/hari
Profit	16698.12	USD/hari

Hasil variabel yang telah dioptimisasi tersebut kemudian dibandingkan pada teknik optimisasi menggunakan GA dan DA untuk mengetahui teknik optimisasi yang dapat memperoleh hasil paling maksimum terhadap nilai profit. Tabel 4.7 menunjukkan hasil nilai profit dari CO₂-foam EOR setelah dioptimisasi dengan dua jenis teknik optimisasi tersebut.

Tabel 4.7 Hasil profit CO₂-foam EOR setelah dioptimisasi

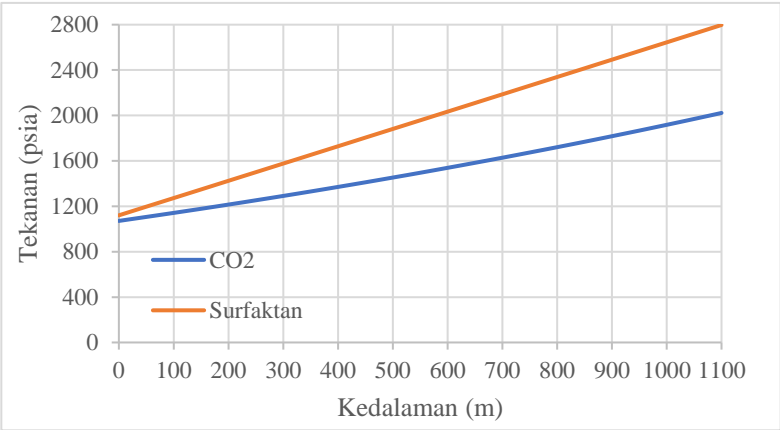
Teknik Optimisasi	Profit	Satuan	Peningkatan (%)
GA	25978.15	USD/hari	81.03
DA	16698.12	USD/hari	14.06

Berdasarkan hasil profit dari kedua jenis teknik optimisasi diperoleh hasil optimisasi terbaik dari teknik optimisasi GA dengan hasil plot *fitness* terbaik setiap generasi pada proses optimisasi GA ditunjukkan pada Gambar 4.11. Proses optimisasi GA menghasilkan nilai profit sebesar 25978.15 USD/hari atau mengalami peningkatan profit dibandingkan sebelum dilakukan optimisasi sebesar 81.03%, sedangkan optimisasi dengan DA menghasilkan nilai profit yang lebih rendah dibandingkan dengan GA dengan peningkatan 14.06%.

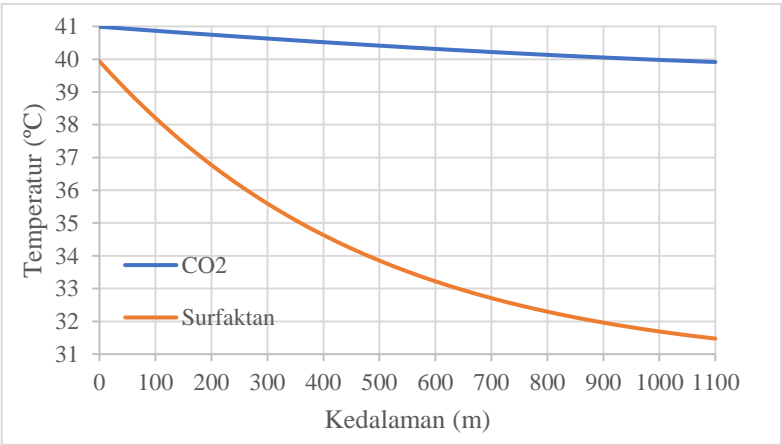


Gambar 4.11 Plot *fitness* terbaik setiap generasi GA

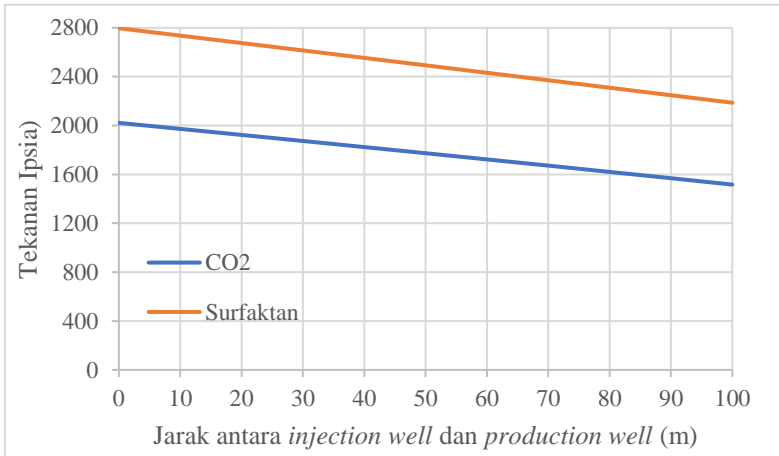
Dengan parameter input sesuai dengan Tabel 4.4 untuk hasil optimisasi GA, maka plot grafik tekanan dan temperatur CO₂-foam EOR pada *injection* hingga *production well* ditunjukkan pada Gambar 4.18 hingga 4.24.



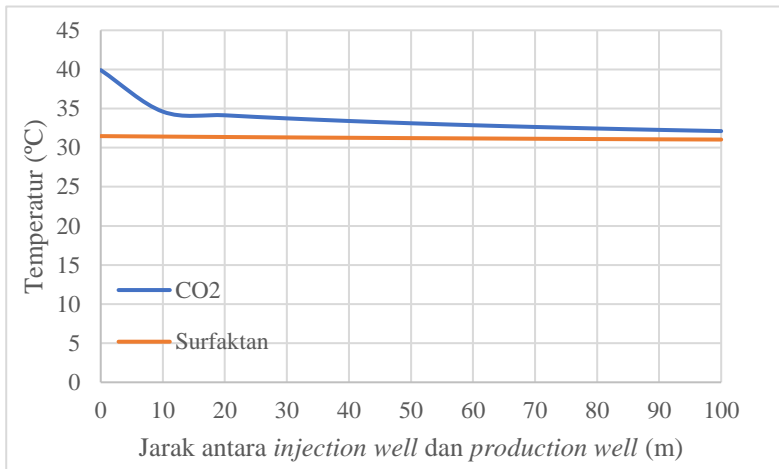
Gambar 4.12 Grafik tekanan injeksi CO₂-foam terhadap kedalaman pada *injection well* setelah dilakukan optimisasi



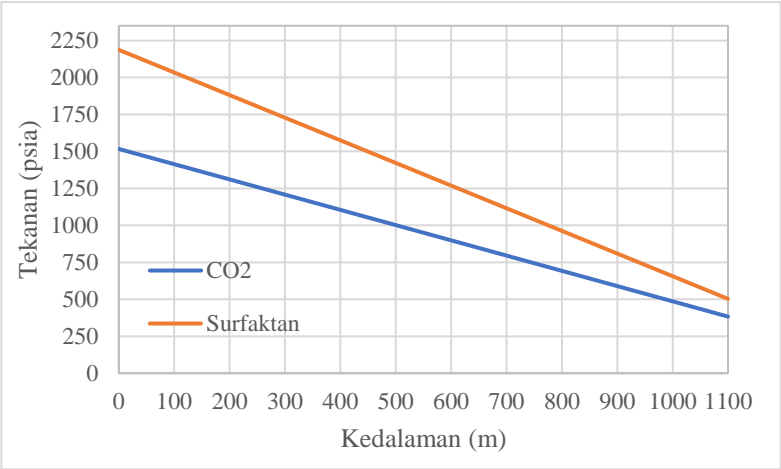
Gambar 4.13 Grafik temperatur injeksi CO₂-foam terhadap kedalaman pada *injection well* setelah dilakukan optimisasi



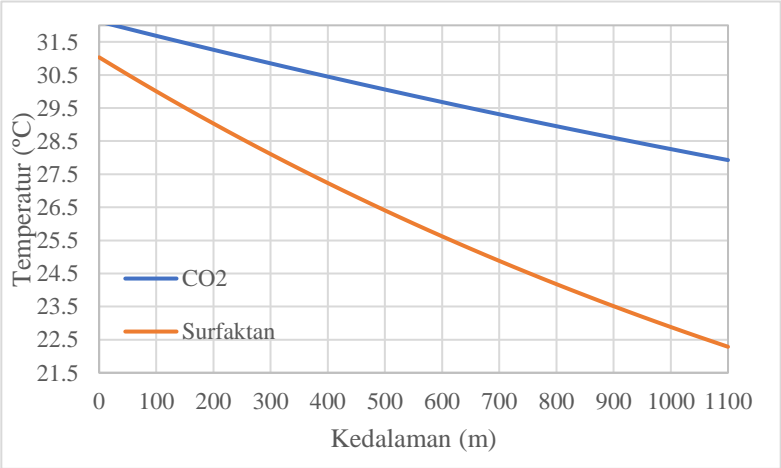
Gambar 4.14 Grafik tekanan CO₂-foam terhadap kedalaman pada *reservoir* setelah dilakukan optimisasi



Gambar 4.15 Grafik temperatur CO₂-foam terhadap kedalaman pada *injection well* setelah dilakukan optimisasi



Gambar 4.16 Grafik tekanan CO₂-foam pada *production well* setelah dilakukan optimisasi



Gambar 4.17 Grafik temperatur CO₂-foam pada *production well* setelah dilakukan optimisasi

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari hasil tugas akhir mengenai optimisasi kondisi operasi *CO₂-foam flood EOR* adalah sebagai berikut.

1. *CO₂-foam flood EOR* dimodelkan dengan baik, terbukti dengan pemodelan pada *injection well* dan *production well* menunjukkan rata-rata *error* secara berurutan sebesar 0.375% dan 4.213% untuk tekanan serta 0.385% dan 2.782% untuk temperatur jika dibandingkan dengan *software* PIPESIM. Pada *reservoir* menunjukkan rata-rata *error* sebesar 0.22% untuk tekanan dan 2.613% untuk temperatur jika dibandingkan dengan *software* COMSOL *Multiphysics*.
2. Berdasarkan analisis sensitivitas, fungsi objektif (profit) dipengaruhi oleh variabel-variabel input berupa laju aliran massa, tekanan injeksi, temperatur dan konsentrasi dari CO₂ dan surfaktan. Pada injeksi CO₂, profit akan meningkat jika laju aliran massa dan temperatur meningkat. Penurunan profit terjadi jika tekanan injeksi CO₂ meningkat. Pada injeksi surfaktan, profit akan meningkat jika temperatur injeksi meningkat. Penurunan profit terjadi jika laju aliran massa, konsentrasi dan tekanan injeksi surfaktan meningkat.
3. Hasil paling optimum kondisi operasi *CO₂-foam flood* didapatkan menggunakan teknik optimisasi GA dengan peningkatan profit sebesar 81.03% jika dibandingkan dengan teknik optimisasi DA yang memiliki peningkatan profit sebesar 14.06%. Pada studi kasus San Ardo Field, Monterey County, California, USA, profit dapat dioptimisasi dari 14350.15 USD/hari menjadi 25978.15 USD/hari.

5.2. Saran

Hal yang dapat penulis sarankan dalam penelitian selanjutnya adalah:

1. Mendapatkan karakteristik (*properties*) fluida sesuai dengan kondisi sesungguhnya agar hasil pemodelan dapat lebih akurat.
2. Menggunakan metode optimisasi yang lain agar mendapatkan hasil yang lebih maksimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. S. Alias, S. Ridha and U. Yerikania, "Effect of Chemical EOR on Class G Oilwell Cement Integrity under Elevated Conditions," *Elsevier*, pp. 1066-1073, 2016.
- [2] P. James J. Sheng, *Modern Chemical Enhanced Oil Recovery Theory and Practice*, Kiddlington, Oxford : Elsevier, 2011.
- [3] A. S. Dharma, "Simulation Studies of *Foam* for Enhanced Oil Recovery," *Petroleum Engineering*, pp. 10-11, 2013.
- [4] S. H. Talebian, R. Masoudi, I. M. Tan and P. L. J. Zitha, "*Foam* Assited CO₂-EOR : A Review of Concepts, Challenges, and Future Prospect," *Elsevier* , pp. 202-215, 2014.
- [5] S. Jong, N. M. Nguyen and C. M. Eberle, "Low Tension Gas Flooding as a Novel EOR Method : An Experimental and Theoretical Investigation," *Society of Petroleum Engineers*, no. 1, 2016.
- [6] T. Ydstebø, "Enhanced Oil Recovery by CO₂ and CO₂ *Foam* in Fractured Carbonates," 2013.
- [7] J. S. Solbakken, "Experimental Studies of N₂ and CO₂-*Foam* Properties in Relation to Enhanced Oil Recovery Applications," *Centre for Integrated Petroleum Engineer*, 2015.
- [8] N. Zanganeh, "Simulation and Optimizaton of *Foam* EOR Process," Proefschriftmaken.nl, Teheran, 2011.
- [9] H. Hematpour, S. M. Mahmood, S. akbari and A. S. Asl, "*Foam* Modelling Approaches in Enhanced Oil Recovery : A Review," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. IX, no. 22, 2016.

- [10] S. Chang and R. Grigg, "Effects of *Foam* Quality and Flow Rate on CO₂ *Foam* Behaviour at Reservoir Temperature and Pressure," *Society of Petroleum Engineers*, vol. II, no. 3, pp. 248-255, 1999.
- [11] A. Aronson, B. V., F. M.E. and R. C.J., "The influence of disjoining pressure on *foam* stability and flow in porous media," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, no. 83, pp. 109-120, 1994.
- [12] Z. Khatib, G. Hirasaki and A. Falls, "Effects of Capillary Pressure on Coalescence and Phase Mobilities in *Foams* Flowing Through Porous Media," *Society of Petroleum Engineers*, pp. 919-926, 1988.
- [13] R. Farajzadeh, A. Andrianov and P. Zitha, "*Foam* Assisted Enhanced Oil Recovery at Miscible and Immiscible Conditions," *Society of Petroleum Engineers*, 2009.
- [14] D. Tiab and E. C. Donaldson, *Petrophysics : Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*, Kidlington : Gulf Professional Publishing, 2012.
- [15] Y. A. Cengel and J. M. Cimbala, *Fluid Mechanics Fundamental and Applications*, New York: McGraw-Hill, 2006.
- [16] H. D. a. B. Beggs, "A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes," *SPE-AIME*, pp. 616-617, 1973.
- [17] T. V. Golf-Racht, *Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering*, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.
- [18] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [19] K. E. Kinnear, *Advances in Genetic Programming*, Cambridge: MIT Press, 1994.
- [20] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

- [21] M. Mitchell, Genetic Algorithm : An Overview, Complexity, 1995.
- [22] e. a. Ce´sar, "Multi-objective optimization of steam power plants for sustainable," *Clean Techn Environ Policy*, pp. 551-566, 2013.
- [23] T. R. Biyanto, G. Nugroho, H. Huda and E. Listijorini, "Duelist Algorithm: An Algorithm Inspired by How Duelist Improve Their Capabilities in a Duel," in *International Conference in Swarm Intelligence*, Bali, 2016.
- [24] D. D. Simone, "Enhanced Oil Recovery Potential in the United States," U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1978.
- [25] I. Fukai, S. Mishtra and M. A. Moody, "Economic analysis of CO₂-Enhanced oil recovery in Ohio : Implications for carbon capture, utilization and storage in the Appalachian Basinregion," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, no. 52, pp. 357-377, 2016.
- [26] B. R. Munson, D. F. Young and T. T. H. Okiishi, Fundamentals of fluid mechanics, Melbourne: John Wiley & Sons, 2002.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

LAMPIRAN A Validasi Pemodelan Temperatur dan Tekanan pada *Injection Well*

Validasi model pada *injection well* dilakukan dengan membandingkan hasil model dengan hasil simulasi pada perangkat lunak PIPESIM. Pada Tabel A1, nilai laju aliran massa injeksi CO₂ divariasikan, tekanan dan temperatur injeksi yang tetap. Nilai variasi berada diantara nilai 0.2 hingga 0.5 kg/s.

Tabel A1 Validasi model injeksi CO₂ terhadap variasi laju aliran massa injeksi

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0.2	0	1086.48	31.028	1071.00	31.000	1.43	0.09
0.2	50	1121.63	32.066	1110.96	30.998	0.95	3.33
0.2	100	1157.89	32.572	1151.72	30.996	0.53	4.84
0.2	150	1195.63	33.187	1193.30	30.994	0.19	6.61
0.2	200	1235.29	33.169	1235.70	30.993	0.03	6.56
0.2	250	1277.02	33.198	1278.95	30.991	0.15	6.65
0.2	300	1320.82	32.830	1323.06	30.989	0.17	5.61
0.2	350	1370.81	32.485	1368.06	30.988	0.20	4.61
0.2	400	1417.98	32.211	1413.94	30.986	0.28	3.80
0.2	450	1466.31	32.009	1460.75	30.985	0.38	3.20
0.2	500	1515.69	31.897	1508.48	30.984	0.48	2.86
0.2	550	1578.99	31.749	1557.17	30.982	1.38	2.41
0.2	600	1629.72	31.713	1606.83	30.981	1.40	2.31
0.2	650	1681.20	31.629	1657.48	30.980	1.41	2.05
0.2	700	1733.29	31.601	1709.14	30.979	1.39	1.97
0.2	750	1786.00	31.564	1761.83	30.978	1.35	1.85

Tabel A1 (lanjutan)

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0.2	800	1839.29	31.527	1815.57	30.978	1.29	1.74
0.2	850	1900.34	31.509	1870.38	30.977	1.58	1.69
0.2	900	1953.48	31.465	1926.29	30.976	1.39	1.55
0.2	950	2007.09	31.450	1983.31	30.976	1.18	1.51
0.2	1000	2061.16	31.447	2041.47	30.976	0.96	1.50
0.2	1050	2115.68	31.411	2100.79	30.976	0.70	1.38
0.2	1100	2141.97	31.405	2161.29	30.996	0.90	1.30
0.3	0	1086.45	31.384	1071.00	31.000	1.42	1.22
0.3	50	1120.53	32.336	1109.09	30.998	1.02	4.14
0.3	100	1155.56	32.936	1147.94	30.996	0.66	5.89
0.3	150	1191.78	33.820	1187.56	30.994	0.35	8.36
0.3	200	1229.60	33.988	1227.97	30.992	0.13	8.82
0.3	250	1269.34	34.228	1269.18	30.990	0.01	9.46
0.3	300	1311.14	34.087	1311.22	30.988	0.01	9.09
0.3	350	1359.16	33.655	1354.09	30.986	0.37	7.93
0.3	400	1404.78	33.313	1397.81	30.984	0.50	6.99
0.3	450	1451.84	32.918	1442.40	30.983	0.65	5.88
0.3	500	1500.17	32.674	1487.89	30.981	0.82	5.18
0.3	550	1562.42	32.353	1534.27	30.979	1.80	4.25
0.3	600	1612.47	32.214	1581.58	30.978	1.92	3.84
0.3	650	1663.36	32.079	1629.84	30.977	2.02	3.44
0.3	700	1714.94	31.984	1679.05	30.975	2.09	3.15
0.3	750	1767.18	31.935	1729.24	30.974	2.15	3.01
0.3	800	1820.05	31.848	1780.44	30.973	2.18	2.75
0.3	850	1880.66	31.796	1832.65	30.972	2.55	2.59
0.3	900	1933.44	31.747	1885.91	30.972	2.46	2.44

Tabel A1 (lanjutan)

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0.3	950	1986.73	31.703	1940.22	30.971	2.34	2.31
0.3	1000	2040.49	31.686	1995.62	30.970	2.20	2.26
0.3	1050	2094.71	31.651	2052.12	30.970	2.03	2.15
0.3	1100	2120.87	31.633	2109.75	30.970	0.52	2.10
0.4	0	1086.43	31.526	1071.00	31.000	1.42	1.67
0.4	50	1119.94	32.484	1107.26	30.998	1.13	4.58
0.4	100	1154.26	33.148	1144.24	30.995	0.87	6.49
0.4	150	1189.56	34.186	1181.95	30.993	0.64	9.34
0.4	200	1226.19	34.523	1220.41	30.991	0.47	10.23
0.4	250	1264.54	34.946	1259.63	30.989	0.39	11.32
0.4	300	1304.80	35.101	1299.63	30.986	0.40	11.72
0.4	350	1351.13	34.719	1340.43	30.984	0.79	10.76
0.4	400	1395.29	34.441	1382.03	30.982	0.95	10.04
0.4	450	1441.04	33.947	1424.46	30.981	1.15	8.74
0.4	500	1488.21	33.594	1467.73	30.979	1.38	7.78
0.4	550	1549.24	33.151	1511.86	30.977	2.41	6.56
0.4	600	1598.49	32.890	1556.87	30.975	2.60	5.82
0.4	650	1648.69	32.682	1602.77	30.974	2.79	5.23
0.4	700	1699.68	32.490	1649.58	30.972	2.95	4.67
0.4	750	1751.41	32.377	1697.33	30.971	3.09	4.34
0.4	800	1803.83	32.249	1746.02	30.970	3.20	3.97
0.4	850	1863.97	32.140	1795.68	30.969	3.66	3.64
0.4	900	1916.39	32.079	1846.33	30.967	3.66	3.46
0.4	950	1969.34	31.996	1897.99	30.967	3.62	3.22
0.4	1000	2022.79	31.952	1950.67	30.966	3.57	3.09

Tabel A1 (lanjutan)

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0.4	1050	2076.73	31.92	2004.40	30.97	3.48	2.98
0.4	1100	2102.75	31.89	2059.20	30.96	2.07	2.89
0.5	0	1086.42	31.61	1071.00	31.00	1.42	1.93
0.5	50	1119.58	32.58	1105.48	31.00	1.26	4.85
0.5	100	1153.45	33.28	1140.64	30.99	1.11	6.88
0.5	150	1188.14	34.40	1176.50	30.99	0.98	9.90
0.5	200	1223.96	34.89	1213.06	30.99	0.89	11.18
0.5	250	1261.31	35.38	1250.34	30.99	0.87	12.41
0.5	300	1300.41	35.69	1288.36	30.99	0.93	13.17
0.5	350	1345.30	35.55	1327.13	30.98	1.35	12.84
0.5	400	1388.09	35.43	1366.67	30.98	1.54	12.56
0.5	450	1432.53	35.01	1406.99	30.98	1.78	11.52
0.5	500	1478.51	34.60	1448.10	30.98	2.06	10.46
0.5	550	1538.22	34.08	1490.03	30.97	3.13	9.10
0.5	600	1586.57	33.71	1532.79	30.97	3.39	8.11
0.5	650	1635.98	33.43	1576.39	30.97	3.64	7.36
0.5	700	1686.29	33.13	1620.86	30.97	3.88	6.53
0.5	750	1737.42	32.93	1666.20	30.97	4.10	5.97
0.5	800	1789.31	32.75	1712.45	30.97	4.30	5.46
0.5	850	1848.94	32.57	1759.61	30.97	4.83	4.92
0.5	900	1900.96	32.47	1807.71	30.96	4.91	4.63
0.5	950	1953.55	32.35	1856.76	30.96	4.95	4.28
0.5	1000	2006.67	32.26	1906.78	30.96	4.98	4.04
0.5	1050	2060.29	32.22	1957.80	30.96	4.97	3.90
0.5	1100	2086.18	32.18	2009.83	30.96	3.66	3.78
AVERAGE ERROR						1.76	5.38

Pada Tabel A2 tekanan injeksi CO₂ divariasikan dengan laju aliran massa dan temperatur injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 1071 hingga 1200 psia.

Tabel A2 Validasi model injeksi CO₂ terhadap variasi tekanan injeksi

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
1071	0	1086.45	31.39	1071.0	31.00	1.42	1.25
1071	50	1120.51	32.34	1109.0	31.00	1.03	4.16
1071	100	1155.50	32.95	1147.8	31.00	0.67	5.93
1071	150	1191.67	33.84	1187.3	30.99	0.37	8.41
1071	200	1229.42	34.02	1227.6	30.99	0.15	8.89
1071	250	1269.09	34.26	1268.8	30.99	0.03	9.56
1071	300	1310.81	34.14	1310.7	30.99	0.01	9.23
1071	350	1358.75	33.71	1353.5	30.99	0.39	8.07
1071	400	1404.31	33.36	1397.1	30.98	0.51	7.13
1071	450	1451.31	32.96	1441.6	30.98	0.67	6.01
1071	500	1499.59	32.71	1487.0	30.98	0.84	5.29
1071	550	1561.79	32.38	1533.3	30.98	1.83	4.34
1071	600	1611.80	32.24	1580.5	30.98	1.94	3.92
1071	650	1662.66	32.10	1628.6	30.98	2.05	3.51
1071	700	1714.22	32.00	1677.7	30.98	2.13	3.21
1071	750	1766.44	31.95	1727.8	30.97	2.19	3.06
1071	800	1819.29	31.86	1778.9	30.97	2.22	2.80
1071	850	1879.88	31.81	1831.0	30.97	2.60	2.63
1071	900	1932.65	31.76	1884.2	30.97	2.51	2.49
1071	950	1985.92	31.71	1938.3	30.97	2.40	2.35
1071	1000	2039.66	31.70	1993.6	30.97	2.26	2.29
1071	1050	2093.88	31.66	2050.0	30.97	2.10	2.19

Tabel A2 (lanjutan)

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
1071	1100	2148.52	31.63	2107.5	30.97	1.91	2.09
1100	0	1118.55	30.37	1100.0	31.00	1.66	2.07
1100	50	1158.89	31.45	1138.6	31.00	1.75	1.43
1100	100	1199.69	32.18	1177.9	31.00	1.81	3.69
1100	150	1241.32	32.57	1218.1	30.99	1.87	4.84
1100	200	1284.04	33.05	1259.0	30.99	1.95	6.21
1100	250	1328.07	33.01	1300.8	30.99	2.06	6.13
1100	300	1373.42	32.96	1343.3	30.99	2.19	5.99
1100	350	1377.84	32.96	1386.8	30.99	0.65	5.98
1100	400	1472.46	32.60	1431.1	30.98	2.81	4.96
1100	450	1521.39	32.45	1476.2	30.98	2.97	4.53
1100	500	1571.28	32.28	1522.3	30.98	3.12	4.03
1100	550	1635.18	32.16	1569.3	30.98	4.03	3.67
1100	600	1686.37	32.03	1617.2	30.98	4.10	3.29
1100	650	1738.27	31.97	1666.1	30.98	4.15	3.11
1100	700	1790.80	31.90	1716.0	30.98	4.18	2.90
1100	750	1843.93	31.84	1766.8	30.97	4.18	2.72
1100	800	1897.62	31.81	1818.7	30.97	4.16	2.64
1100	850	1959.12	31.74	1871.6	30.97	4.47	2.41
1100	900	2012.63	31.71	1925.5	30.97	4.33	2.31
1100	950	2066.61	31.69	1980.5	30.97	4.17	2.27
1100	1000	2121.04	31.64	2036.6	30.97	3.98	2.12
1100	1050	2175.90	31.62	2093.9	30.97	3.77	2.06
1100	1100	2231.18	31.62	2152.2	30.97	3.54	2.05
1200	0	1221.35	29.66	1200.0	31.00	1.75	4.50
1200	50	1267.18	30.95	1240.6	31.00	2.10	0.17

Pada Tabel A3 Temperatur injeksi CO₂ divariasikan dengan laju aliran massa dan tekanan injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 31 hingga 39 °C.

Tabel A3 Validasi model injeksi CO₂ terhadap variasi temperatur injeksi

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
31	0	1086.45	31.39	1071.00	31.00	1.42	1.25
31	50	1120.51	32.34	1109.01	31.00	1.03	4.16
31	100	1155.50	32.95	1147.78	31.00	0.67	5.93
31	150	1191.67	33.84	1187.31	30.99	0.37	8.41
31	200	1229.42	34.02	1227.64	30.99	0.15	8.89
31	250	1269.09	34.26	1268.76	30.99	0.03	9.56
31	300	1310.81	34.14	1310.70	30.99	0.01	9.23
31	350	1358.75	33.71	1353.48	30.99	0.39	8.07
31	400	1404.31	33.36	1397.11	30.98	0.51	7.13
31	450	1451.31	32.96	1441.61	30.98	0.67	6.01
31	500	1499.59	32.71	1486.99	30.98	0.84	5.29
31	550	1561.79	32.38	1533.28	30.98	1.83	4.34
31	600	1611.80	32.24	1580.49	30.98	1.94	3.92
31	650	1662.66	32.10	1628.64	30.98	2.05	3.51
31	700	1714.22	32.00	1677.74	30.98	2.13	3.21
31	750	1766.44	31.95	1727.83	30.97	2.19	3.06
31	800	1819.29	31.86	1778.91	30.97	2.22	2.80
31	850	1879.88	31.81	1831.01	30.97	2.60	2.63
31	900	1932.65	31.76	1884.15	30.97	2.51	2.49
31	950	1985.92	31.71	1938.35	30.97	2.40	2.35
31	1000	2039.66	31.70	1993.62	30.97	2.26	2.29
31	1100	2148.52	31.63	2107.50	30.97	1.91	2.09

Tabel A3 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
32	50	1115.79	33.08	1108.96	31.99	0.61	3.29
32	100	1147.36	33.77	1147.68	31.99	0.03	5.28
32	150	1179.96	34.73	1187.17	31.98	0.61	7.93
32	200	1214.03	35.24	1227.44	31.97	1.10	9.28
32	250	1250.21	35.43	1268.52	31.97	1.46	9.77
32	300	1288.66	35.66	1310.41	31.96	1.69	10.37
32	350	1333.44	35.21	1353.13	31.95	1.48	9.26
32	400	1376.55	34.74	1396.71	31.95	1.46	8.04
32	450	1421.52	34.19	1441.15	31.94	1.38	6.58
32	500	1468.10	33.73	1486.48	31.94	1.25	5.32
32	550	1528.52	33.29	1532.71	31.93	0.27	4.07
32	600	1577.35	32.99	1579.87	31.93	0.16	3.23
32	650	1627.16	32.81	1627.96	31.92	0.05	2.70
32	700	1677.79	32.60	1677.01	31.92	0.05	2.10
32	750	1729.18	32.47	1727.03	31.91	0.12	1.71
32	800	1781.27	32.36	1778.05	31.91	0.18	1.38
32	850	1841.08	32.22	1830.09	31.91	0.60	0.96
32	900	1893.24	32.14	1883.17	31.91	0.53	0.73
32	950	1945.95	32.04	1937.30	31.90	0.44	0.43
32	1000	1999.18	31.96	1992.51	31.90	0.33	0.20
32	1050	2052.91	31.91	2048.82	31.90	0.20	0.03
32	1100	2107.13	31.83	2106.26	31.90	0.04	0.23
33	0	1083.53	32.91	1071.00	33.00	1.16	0.27
33	50	1111.28	33.77	1108.91	32.99	0.21	2.32
33	100	1139.50	34.50	1147.58	32.98	0.71	4.42
33	150	1168.59	35.49	1187.02	32.96	1.58	7.11

Tabel A3 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
33	200	1199.18	36.18	1227.25	32.95	2.34	8.92
33	250	1231.79	36.35	1268.27	32.94	2.96	9.37
33	300	1266.62	36.57	1310.11	32.93	3.43	9.94
33	350	1307.52	36.52	1352.79	32.92	3.46	9.85
33	400	1347.39	36.14	1396.31	32.91	3.63	8.92
33	450	1389.52	35.77	1440.70	32.90	3.68	8.02
33	500	1433.76	35.12	1485.97	32.89	3.64	6.33
33	550	1491.83	34.39	1532.15	32.89	2.70	4.38
33	600	1539.17	33.91	1579.25	32.88	2.60	3.04
33	650	1587.71	33.55	1627.28	32.87	2.49	2.03
33	700	1637.23	33.30	1676.27	32.86	2.38	1.31
33	750	1687.64	33.04	1726.24	32.86	2.29	0.55
33	800	1738.85	32.87	1777.20	32.85	2.21	0.05
33	850	1797.78	32.66	1829.17	32.84	1.75	0.57
33	900	1849.23	32.51	1882.19	32.84	1.78	1.02
33	950	1901.30	32.40	1936.26	32.84	1.84	1.36
33	1000	1953.95	32.25	1991.40	32.83	1.92	1.80
33	1050	2007.14	32.14	2047.65	32.83	2.02	2.15
33	1100	2060.85	32.05	2105.01	32.83	2.14	2.45
34	0	1082.08	33.70	1071.00	34.00	1.02	0.89
34	50	1106.75	34.42	1108.87	33.98	0.19	1.26
34	100	1131.66	35.16	1147.49	33.97	1.40	3.39
34	150	1157.46	36.36	1186.88	33.95	2.54	6.62
34	200	1184.75	36.98	1227.05	33.93	3.57	8.23
34	250	1213.86	37.18	1268.03	33.92	4.46	8.78
34	300	1245.12	37.37	1309.82	33.90	5.20	9.27

Tabel A3 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
34	350	1282.02	37.63	1352.44	33.89	5.49	9.94
34	400	1318.34	37.35	1395.91	33.88	5.88	9.29
34	450	1357.18	36.98	1440.25	33.86	6.12	8.42
34	500	1398.47	36.57	1485.46	33.85	6.22	7.43
34	550	1453.47	35.66	1531.58	33.84	5.37	5.11
34	600	1498.87	35.10	1578.62	33.83	5.32	3.61
34	650	1545.82	34.48	1626.60	33.82	5.23	1.92
34	700	1594.00	34.04	1675.53	33.81	5.11	0.70
34	750	1643.26	33.71	1725.44	33.80	5.00	0.25
34	800	1693.46	33.40	1776.34	33.79	4.89	1.16
34	850	1751.36	33.14	1828.25	33.78	4.39	1.93
34	900	1802.04	32.91	1881.20	33.78	4.39	2.62
34	950	1853.39	32.73	1935.21	33.77	4.41	3.19
34	1000	1905.38	32.58	1990.29	33.77	4.46	3.65
34	1050	1957.97	32.39	2046.47	33.76	4.52	4.24
34	1100	2011.13	32.24	2103.77	33.76	4.61	4.73
35	0	1080.64	34.51	1071.00	35.00	0.89	1.41
35	50	1102.26	35.03	1108.82	34.98	0.60	0.14
35	100	1124.10	36.52	1147.39	34.96	2.07	4.28
35	150	1147.10	37.28	1186.73	34.94	3.46	6.28
35	200	1171.54	37.65	1226.86	34.92	4.72	7.25
35	250	1197.63	37.85	1267.78	34.90	5.86	7.79
35	300	1225.73	37.99	1309.52	34.88	6.84	8.20
35	350	1259.08	38.19	1352.09	34.86	7.39	8.73
35	400	1292.07	38.35	1395.51	34.84	8.01	9.14
35	450	1327.71	37.93	1439.79	34.82	8.44	8.20

Tabel A3 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
35	500	1366.06	37.54	1484.95	34.81	8.70	7.29
35	550	1417.87	36.76	1531.02	34.79	7.98	5.34
35	600	1461.21	36.00	1578.00	34.78	7.99	3.39
35	650	1506.48	35.38	1625.92	34.76	7.93	1.74
35	700	1553.33	34.66	1674.79	34.75	7.82	0.25
35	750	1601.52	34.15	1724.64	34.74	7.69	1.72
35	800	1650.84	33.73	1775.48	34.73	7.55	2.96
35	850	1707.91	33.30	1827.33	34.72	6.99	4.26
35	900	1757.99	33.03	1880.22	34.71	6.95	5.10
35	950	1808.84	32.73	1934.16	34.70	6.93	6.02
35	1000	1860.40	32.49	1989.18	34.70	6.92	6.79
35	1050	1912.62	32.28	2045.29	34.69	6.94	7.48
35	1100	1965.47	32.04	2102.52	34.69	6.97	8.29
36	0	1080.06	34.86	1071.00	36.00	0.84	3.28
36	50	1100.33	35.76	1108.77	35.97	0.77	0.59
36	100	1120.91	37.35	1147.30	35.95	2.35	3.75
36	150	1142.50	37.91	1186.59	35.92	3.86	5.25
36	200	1165.36	38.17	1226.66	35.90	5.26	5.96
36	250	1189.68	38.31	1267.54	35.87	6.54	6.35
36	300	1215.73	38.48	1309.22	35.85	7.69	6.83
36	350	1246.66	38.69	1351.74	35.83	8.43	7.41
36	400	1277.28	38.93	1395.11	35.81	9.22	8.02
36	450	1310.43	38.74	1439.34	35.79	9.84	7.64
36	500	1346.37	38.36	1484.45	35.77	10.26	6.77
36	550	1395.36	37.85	1530.45	35.75	9.68	5.56
36	600	1436.80	36.95	1577.38	35.73	9.78	3.31

Tabel A3 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
36	650	1480.43	36.21	1625.24	35.71	9.78	1.38
36	700	1525.91	35.51	1674.05	35.70	9.71	0.52
36	750	1572.97	34.82	1723.84	35.68	9.59	2.47
36	800	1621.36	34.30	1774.62	35.67	9.45	4.01
36	850	1677.57	33.73	1826.41	35.66	8.87	5.73
36	900	1727.01	33.35	1879.24	35.65	8.81	6.89
36	950	1777.30	33.02	1933.11	35.64	8.77	7.92
36	1000	1828.37	32.70	1988.06	35.63	8.73	8.97
36	1050	1880.15	32.43	2044.11	35.63	8.72	9.87
36	1100	1932.62	32.15	2101.27	35.62	8.73	10.81
37	0	1079.78	35.09	1071.00	37.00	0.81	5.45
37	50	1099.31	36.67	1108.73	36.97	0.86	0.81
37	100	1119.08	38.00	1147.20	36.94	2.51	2.79
37	150	1139.67	38.47	1186.44	36.91	4.10	4.05
37	200	1161.33	38.66	1226.47	36.88	5.61	4.60
37	250	1184.23	38.74	1267.29	36.85	7.01	4.88
37	300	1208.62	38.91	1308.93	36.82	8.30	5.37
37	350	1237.50	39.18	1351.39	36.80	9.20	6.08
37	400	1266.14	39.44	1394.71	36.77	10.15	6.77
37	450	1297.23	39.46	1438.88	36.75	10.92	6.86
37	500	1331.01	39.09	1483.94	36.72	11.49	6.06
37	550	1377.38	38.63	1529.89	36.70	11.07	4.98
37	600	1416.95	37.89	1576.76	36.68	11.28	3.19
37	650	1458.97	37.03	1624.56	36.66	11.35	1.01
37	700	1503.06	36.31	1673.32	36.64	11.33	0.91
37	750	1548.98	35.52	1723.04	36.63	11.24	3.10

Tabel A3 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
37	800	1596.42	34.86	1773.76	36.61	11.11	5.02
37	850	1651.76	34.19	1825.49	36.60	10.52	7.04
37	900	1700.58	33.70	1878.25	36.59	10.45	8.57
37	950	1750.33	33.31	1932.07	36.57	10.38	9.80
37	1000	1800.94	32.92	1986.95	36.57	10.33	11.08
37	1050	1852.33	32.58	2042.93	36.56	10.29	12.23
37	1100	1904.44	32.27	2100.02	36.56	10.27	13.27
38	0	1079.50	35.66	1071.00	38.00	0.79	6.56
38	50	1098.44	37.52	1108.68	37.96	0.93	1.19
38	100	1117.48	38.64	1147.11	37.93	2.65	1.84
38	150	1137.16	39.00	1186.30	37.89	4.32	2.84
38	200	1157.74	39.14	1226.28	37.86	5.92	3.27
38	250	1179.43	39.19	1267.05	37.83	7.43	3.49
38	300	1202.45	39.42	1308.63	37.80	8.83	4.13
38	350	1229.80	39.71	1351.05	37.77	9.86	4.88
38	400	1257.02	39.84	1394.30	37.74	10.92	5.28
38	450	1286.59	39.93	1438.42	37.71	11.80	5.56
38	500	1318.80	39.55	1483.43	37.68	12.48	4.73
38	550	1363.18	39.11	1529.32	37.66	12.19	3.72
38	600	1401.27	38.59	1576.13	37.63	12.48	2.48
38	650	1442.01	37.63	1623.88	37.61	12.61	0.04
38	700	1485.00	36.82	1672.58	37.59	12.63	2.08
38	750	1530.00	36.02	1722.25	37.57	12.57	4.30
38	800	1576.68	35.29	1772.90	37.55	12.45	6.42
38	850	1631.31	34.56	1824.57	37.54	11.85	8.63
38	900	1679.63	33.96	1877.27	37.52	11.77	10.49

Tabel A3 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
38	950	1728.96	33.50	1931.02	37.51	11.69	11.98
38	1000	1779.21	33.08	1985.84	37.50	11.61	13.36
38	1050	1830.29	32.67	2041.75	37.49	11.55	14.77
38	1100	1882.14	32.31	2098.77	37.49	11.51	16.03
39	0	1079.22	36.51	1071.00	39.00	0.76	6.81
39	50	1097.59	38.34	1108.63	38.96	1.01	1.61
39	100	1115.94	39.42	1147.01	38.92	2.78	1.26
39	150	1134.89	39.88	1186.16	38.88	4.52	2.50
39	200	1154.75	39.96	1226.08	38.84	6.18	2.80
39	250	1175.71	39.91	1266.80	38.81	7.75	2.75
39	300	1197.91	39.96	1308.34	38.77	9.22	2.97
39	350	1224.17	40.17	1350.70	38.74	10.34	3.58
39	400	1250.24	40.25	1393.90	38.70	11.49	3.85
39	450	1278.53	40.29	1437.97	38.67	12.47	4.02
39	500	1309.30	40.04	1482.92	38.64	13.26	3.50
39	550	1351.79	39.60	1528.76	38.61	13.09	2.49
39	600	1388.34	39.28	1575.51	38.59	13.48	1.76
39	650	1427.66	38.36	1623.20	38.56	13.70	0.53
39	700	1469.43	37.47	1671.84	38.54	13.78	2.86
39	750	1513.36	36.66	1721.45	38.52	13.75	5.05
39	800	1559.17	35.80	1772.04	38.50	13.65	7.52
39	850	1612.98	34.99	1823.65	38.48	13.06	9.97
39	900	1660.75	34.32	1876.28	38.46	12.98	12.07
39	950	1709.61	33.76	1929.97	38.45	12.89	13.88
39	1000	1759.46	33.30	1984.72	38.44	12.80	15.43
39	1050	1810.21	32.82	2040.57	38.43	12.73	17.10

Tabel A3 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
39	1100	1861.78	32.40	2097.53	38.42	12.66	18.60
AVERAGE ERROR						5.71	5.17

Pada Tabel A4 Laju aliran massa injeksi surfaktan divariasikan dengan laju temperatur dan tekanan injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 0.2 hingga 0.5 kg/s.

Tabel A4 Validasi model injeksi surfaktan terhadap variasi laju aliran massa injeksi

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0.2	0	1107.86	20.23	1071.00	31.00	3.33	53.25
0.2	50	1183.90	24.07	1146.90	30.91	3.12	28.39
0.2	100	1259.83	26.53	1222.82	30.82	2.94	16.15
0.2	150	1335.71	28.08	1298.74	30.73	2.77	9.41
0.2	200	1411.55	29.07	1374.67	30.64	2.61	5.39
0.2	250	1487.37	29.70	1450.62	30.54	2.47	2.85
0.2	300	1563.18	30.09	1526.57	30.45	2.34	1.22
0.2	350	1646.25	30.35	1602.53	30.36	2.66	0.05
0.2	400	1722.09	30.49	1678.51	30.27	2.53	0.72
0.2	450	1797.88	30.58	1754.49	30.18	2.41	1.31
0.2	500	1873.73	30.63	1830.49	30.09	2.31	1.78
0.2	550	1969.04	30.68	1906.49	30.00	3.18	2.21
0.2	600	2044.11	30.69	1982.51	29.91	3.01	2.57
0.2	650	2119.24	30.70	2058.53	29.81	2.86	2.90
0.2	700	2194.33	30.71	2134.56	29.72	2.72	3.22

Tabel A4 (lanjutan)

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0.2	750	2269.43	30.71	2210.61	29.63	2.59	3.52
0.2	800	2344.53	30.72	2286.66	29.54	2.47	3.83
0.2	850	2429.63	30.71	2362.73	29.45	2.75	4.12
0.2	900	2502.95	30.71	2438.80	29.36	2.56	4.42
0.2	950	2576.27	30.71	2514.89	29.27	2.38	4.71
0.2	1000	2649.60	30.71	2590.98	29.18	2.21	5.01
0.2	1050	2722.93	30.71	2667.09	29.08	2.05	5.30
0.2	1100	2796.28	30.71	2743.20	28.99	1.90	5.60
0.3	0	1107.82	23.13	1071.00	31.00	3.32	34.00
0.3	50	1183.71	28.03	1146.90	30.91	3.11	10.28
0.3	100	1259.50	29.75	1222.82	30.81	2.91	3.60
0.3	150	1335.26	30.36	1298.74	30.72	2.73	1.20
0.3	200	1411.02	30.55	1374.68	30.63	2.58	0.26
0.3	250E	1486.78	30.61	1450.63	30.54	2.43	0.24
0.3	300	1562.54	30.63	1526.58	30.44	2.30	0.60
0.3	350	1645.57	30.63	1602.55	30.35	2.61	0.92
0.3	400	1721.38	30.63	1678.53	30.26	2.49	1.22
0.3	450	1797.16	30.63	1754.53	30.17	2.37	1.53
0.3	500	1872.98	30.63	1830.53	30.07	2.27	1.83
0.3	550	1968.27	30.63	1906.54	29.98	3.14	2.13
0.3	600	2043.33	30.63	1982.57	29.89	2.97	2.43
0.3	650	2118.44	30.63	2058.60	29.80	2.82	2.73
0.3	700	2193.51	30.63	2134.65	29.70	2.68	3.03
0.3	750	2268.59	30.63	2210.70	29.61	2.55	3.33
0.3	800	2343.68	30.63	2286.77	29.52	2.43	3.63
0.3	850	2428.76	30.63	2362.85	29.43	2.71	3.93

Tabel A4 (lanjutan)

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0.3	900	2502.06	30.63	2438.94	29.33	2.52	4.23
0.3	950	2575.36	30.63	2515.04	29.24	2.34	4.53
0.3	1000	2648.68	30.63	2591.16	29.15	2.17	4.83
0.3	1050	2722.00	30.63	2667.28	29.06	2.01	5.13
0.3	1100	2795.32	30.62	2743.41	28.96	1.86	5.43
0.4	0	1107.78	24.82	1071.00	31.00	3.32	24.89
0.4	50	1183.62	28.01	1147.22	30.91	3.08	10.35
0.4	100	1259.40	29.47	1223.46	30.82	2.85	4.59
0.4	150	1335.15	30.15	1299.71	30.73	2.66	1.94
0.4	200	1410.90	30.44	1375.96	30.64	2.48	0.66
0.4	250	1486.64	30.56	1452.23	30.55	2.31	0.05
0.4	300	1562.39	30.62	1528.51	30.46	2.17	0.52
0.4	350	1645.40	30.64	1604.80	30.37	2.47	0.89
0.4	400	1721.19	30.65	1681.10	30.28	2.33	1.21
0.4	450	1796.94	30.66	1757.41	30.19	2.20	1.53
0.4	500	1872.75	30.67	1833.73	30.10	2.08	1.85
0.4	550	1968.01	30.67	1910.06	30.01	2.94	2.15
0.4	600	2043.05	30.67	1986.41	29.92	2.77	2.45
0.4	650	2118.14	30.67	2062.76	29.83	2.61	2.75
0.4	700	2193.19	30.67	2139.13	29.74	2.47	3.05
0.4	750	2268.25	30.68	2215.50	29.65	2.33	3.34
0.4	800	2343.32	30.68	2291.89	29.56	2.19	3.64
0.4	850	2428.38	30.67	2368.29	29.47	2.47	3.92
0.4	900	2501.65	30.67	2444.70	29.38	2.28	4.21
0.4	950	2574.94	30.67	2521.12	29.29	2.09	4.51
0.4	1000	2648.23	30.67	2597.55	29.20	1.91	4.80

Pada Tabel A5 Konsentrasi injeksi surfaktan divariasikan dengan tekanan, temperatur dan laju aliran massa injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 0.5 hingga 0.9 wt%.

Tabel A5 Validasi model injeksi surfaktan terhadap variasi tekanan injeksi

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0.5	0	1107.78	24.82	1071.00	31.00	3.32	24.89
0.5	50	1183.62	28.01	1147.03	30.91	3.09	10.34
0.5	100	1259.40	29.47	1223.07	30.82	2.88	4.58
0.5	150	1335.15	30.15	1299.13	30.73	2.70	1.93
0.5	200	1410.90	30.44	1375.19	30.64	2.53	0.65
0.5	250	1486.64	30.56	1451.27	30.54	2.38	0.07
0.5	300	1562.39	30.62	1527.35	30.45	2.24	0.54
0.5	350	1645.40	30.64	1603.45	30.36	2.55	0.92
0.5	400	1721.19	30.65	1679.56	30.27	2.42	1.24
0.5	450	1796.94	30.66	1755.68	30.18	2.30	1.57
0.5	500	1872.75	30.67	1831.81	30.09	2.19	1.89
0.5	550	1968.01	30.67	1907.95	30.00	3.05	2.19
0.5	600	2043.05	30.67	1984.10	29.91	2.89	2.50
0.5	650	2118.14	30.67	2060.26	29.81	2.73	2.80
0.5	700	2193.19	30.67	2136.43	29.72	2.59	3.10
0.5	750	2268.25	30.68	2212.62	29.63	2.45	3.40
0.5	800	2343.32	30.68	2288.81	29.54	2.33	3.70
0.5	850	2428.38	30.67	2365.02	29.45	2.61	3.99
0.5	900	2501.65	30.67	2441.24	29.36	2.42	4.28
0.5	950	2574.94	30.67	2517.47	29.27	2.23	4.58
0.5	1000	2648.23	30.67	2593.71	29.18	2.06	4.88
0.5	1050	2721.53	30.67	2669.96	29.09	1.89	5.17

Tabel A5 (lanjutan)

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0.5	1100	2794.83	30.67	2746.22	28.99	1.74	5.47
0.6	0	1107.83	24.44	1071.00	31.00	3.32	26.86
0.6	50	1183.79	28.00	1147.20	30.91	3.09	10.39
0.6	100	1259.67	29.54	1223.41	30.82	2.88	4.32
0.6	150	1335.53	30.21	1299.63	30.73	2.69	1.71
0.6	200	1411.37	30.48	1375.87	30.64	2.52	0.51
0.6	250	1487.22	30.59	1452.11	30.54	2.36	0.14
0.6	300	1563.08	30.63	1528.36	30.45	2.22	0.58
0.6	350	1646.20	30.65	1604.63	30.36	2.53	0.94
0.6	400	1722.10	30.66	1680.91	30.27	2.39	1.25
0.6	450	1797.96	30.66	1757.20	30.18	2.27	1.56
0.6	500	1873.87	30.67	1833.50	30.09	2.15	1.88
0.6	550	1969.27	30.67	1909.81	30.00	3.02	2.19
0.6	600	2044.41	30.67	1986.13	29.91	2.85	2.50
0.6	650	2119.61	30.67	2062.46	29.81	2.70	2.80
0.6	700	2194.77	30.67	2138.80	29.72	2.55	3.10
0.6	750	2269.93	30.67	2215.16	29.63	2.41	3.39
0.6	800	2345.10	30.67	2291.52	29.54	2.28	3.69
0.6	850	2430.28	30.67	2367.90	29.45	2.57	3.98
0.6	900	2503.66	30.67	2444.29	29.36	2.37	4.27
0.6	950	2577.05	30.67	2520.69	29.27	2.19	4.57
0.6	1000	2650.44	30.67	2597.10	29.18	2.01	4.86
0.6	1050	2723.84	30.67	2673.52	29.09	1.85	5.16
0.6	1100	2797.25	30.67	2749.95	28.99	1.69	5.45

Tabel A5 (lanjutan)

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0.7	0	1107.87	24.12	1071.00	31.00	3.33	28.53
0.7	50	1183.91	28.00	1147.25	30.91	3.10	10.39
0.7	100	1259.87	29.60	1223.50	30.82	2.89	4.11
0.7	150	1335.80	30.26	1299.77	30.73	2.70	1.55
0.7	200	1411.73	30.51	1376.05	30.64	2.53	0.42
0.7	250	1487.65	30.60	1452.34	30.54	2.37	0.19
0.7	300	1563.58	30.64	1528.64	30.45	2.23	0.61
0.7	350	1646.80	30.65	1604.96	30.36	2.54	0.95
0.7	400	1722.77	30.66	1681.29	30.27	2.41	1.26
0.7	450	1798.71	30.66	1757.62	30.18	2.28	1.56
0.7	500	1874.70	30.66	1833.97	30.09	2.17	1.86
0.7	550	1970.20	30.66	1910.33	30.00	3.04	2.15
0.7	600	2045.42	30.66	1986.71	29.91	2.87	2.45
0.7	650	2120.70	30.66	2063.09	29.82	2.72	2.74
0.7	700	2195.93	30.66	2139.48	29.72	2.57	3.04
0.7	750	2271.17	30.66	2215.89	29.63	2.43	3.34
0.7	800	2346.43	30.65	2292.31	29.54	2.31	3.63
0.7	850	2431.69	30.65	2368.74	29.45	2.59	3.92
0.7	900	2505.15	30.65	2445.18	29.36	2.39	4.22
0.7	950	2578.61	30.65	2521.63	29.27	2.21	4.51
0.7	1000	2652.09	30.65	2598.10	29.18	2.04	4.81
0.7	1050	2725.56	30.65	2674.57	29.09	1.87	5.10
0.7	1100	2799.05	30.65	2751.06	29.00	1.71	5.40
0.8	0	1107.90	23.85	1071.00	31.00	3.33	29.96

Tabel A5 (lanjutan)

X	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0.8	50	1184.00	28.01	1147.05	30.91	3.12	10.36
0.8	100	1260.02	29.65	1223.11	30.82	2.93	3.94
0.8	150	1336.01	30.30	1299.18	30.73	2.76	1.42
0.8	200	1412.00	30.53	1375.26	30.64	2.60	0.35
0.8	250	1487.98	30.61	1451.36	30.54	2.46	0.23
0.8	300	1563.98	30.64	1527.46	30.45	2.33	0.62
0.8	350	1647.26	30.66	1603.58	30.36	2.65	0.96
0.8	400	1723.29	30.66	1679.70	30.27	2.53	1.26
0.8	450	1799.29	30.66	1755.84	30.18	2.41	1.56
0.8	500	1875.34	30.66	1831.99	30.09	2.31	1.86
0.8	550	1970.92	30.66	1908.15	30.00	3.18	2.15
0.8	600	2046.20	30.66	1984.32	29.91	3.02	2.45
0.8	650	2121.53	30.66	2060.50	29.82	2.88	2.74
0.8	700	2196.83	30.66	2136.69	29.72	2.74	3.04
0.8	750	2272.13	30.66	2212.89	29.63	2.61	3.34
0.8	800	2347.44	30.66	2289.10	29.54	2.49	3.63
0.8	850	2432.78	30.65	2365.33	29.45	2.77	3.92
0.8	900	2506.29	30.65	2441.56	29.36	2.58	4.22
0.8	950	2579.82	30.65	2517.81	29.27	2.40	4.51
0.8	1000	2653.35	30.65	2594.06	29.18	2.23	4.81
0.8	1050	2726.88	30.65	2670.33	29.09	2.07	5.10
0.8	1100	2800.43	30.65	2746.61	29.00	1.92	5.40
0.9	0	1107.92	23.63	1071.00	31.00	3.33	31.20
0.9	50	1184.08	28.02	1146.99	30.91	3.13	10.31
0.9	100	1260.14	29.69	1222.98	30.82	2.95	3.79
0.9	150	1336.18	30.33	1298.99	30.73	2.78	1.32

Tabel A5 (lanjutan)

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0.9	200	1412.21	30.55	1375.01	30.64	2.63	0.29
0.9	250	1488.25	30.62	1451.04	30.54	2.50	0.25
0.9	300	1564.29	30.65	1527.09	30.45	2.38	0.64
0.9	350	1647.62	30.66	1603.14	30.36	2.70	0.96
0.9	400	1723.70	30.66	1679.20	30.27	2.58	1.27
0.9	450	1799.75	30.66	1755.28	30.18	2.47	1.56
0.9	500	1875.85	30.66	1831.36	30.09	2.37	1.86
0.9	550	1971.48	30.66	1907.46	30.00	3.25	2.15
0.9	600	2046.81	30.66	1983.56	29.91	3.09	2.45
0.9	650	2122.20	30.66	2059.68	29.82	2.95	2.74
0.9	700	2197.54	30.66	2135.81	29.72	2.81	3.04
0.9	750	2272.89	30.66	2211.95	29.63	2.68	3.34
0.9	800	2348.25	30.66	2288.10	29.54	2.56	3.63
0.9	850	2433.64	30.65	2364.26	29.45	2.85	3.92
0.9	900	2507.20	30.65	2440.43	29.36	2.66	4.21
0.9	950	2580.77	30.65	2516.62	29.27	2.49	4.51
0.9	1000	2654.35	30.65	2592.81	29.18	2.32	4.80
0.9	1050	2727.93	30.65	2669.02	29.09	2.16	5.10
0.9	1100	2801.52	30.65	2745.23	29.00	2.01	5.40
AVERAGE ERROR						2.55	4.21

Pada Tabel A6 tekanan injeksi surfaktan divariasikan dengan konsentrasi, temperatur dan laju aliran massa injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 1071 hingga 1200 psia.

Tabel A6 Validasi model injeksi surfaktan terhadap variasi tekanan injeksi

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
1071	0	1107.78	24.82	1071.00	31.00	3.32	24.89
1071	50	1183.62	28.01	1147.03	30.91	3.09	10.34
1071	100	1259.40	29.47	1223.07	30.82	2.88	4.58
1071	150	1335.15	30.15	1299.13	30.73	2.70	1.93
1071	200	1410.90	30.44	1375.19	30.64	2.53	0.65
1071	250	1486.64	30.56	1451.27	30.54	2.38	0.07
1071	300	1562.39	30.62	1527.35	30.45	2.24	0.54
1071	350	1645.40	30.64	1603.45	30.36	2.55	0.92
1071	400	1721.19	30.65	1679.56	30.27	2.42	1.24
1071	450	1796.94	30.66	1755.68	30.18	2.30	1.57
1071	500	1872.75	30.67	1831.81	30.09	2.19	1.89
1071	550	1968.01	30.67	1907.95	30.00	3.05	2.19
1071	600	2043.05	30.67	1984.10	29.91	2.89	2.50
1071	650	2118.14	30.67	2060.26	29.81	2.73	2.80
1071	700	2193.19	30.67	2136.43	29.72	2.59	3.10
1071	750	2268.25	30.68	2212.62	29.63	2.45	3.40
1071	800	2343.32	30.68	2288.81	29.54	2.33	3.70
1071	850	2428.38	30.67	2365.02	29.45	2.61	3.99
1071	900	2501.65	30.67	2441.24	29.36	2.42	4.28
1071	950	2574.94	30.67	2517.47	29.27	2.23	4.58
1071	1000	2648.23	30.67	2593.71	29.18	2.06	4.88
1071	1050	2721.53	30.67	2669.96	29.09	1.89	5.17
1071	1100	2794.83	30.67	2746.22	28.99	1.74	5.47
1100	0	1136.78	24.82	1100.00	31.00	3.24	24.89
1100	50	1212.63	28.01	1176.03	30.91	3.02	10.34

Tabel A6 (lanjutan)

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
1100	100	1288.41	29.47	1252.08	30.82	2.82	4.58
1100	150	1364.17	30.15	1328.14	30.73	2.64	1.93
1100	200	1439.91	30.44	1404.20	30.64	2.48	0.65
1100	250	1515.66	30.56	1480.28	30.54	2.33	0.07
1100	300	1591.41	30.62	1556.37	30.45	2.20	0.54
1100	350	1674.42	30.64	1632.47	30.36	2.51	0.92
1100	400	1750.22	30.65	1708.58	30.27	2.38	1.24
1100	450	1825.97	30.66	1784.70	30.18	2.26	1.57
1100	500	1901.78	30.67	1860.84	30.09	2.15	1.89
1100	550	1997.05	30.67	1936.98	30.00	3.01	2.19
1100	600	2072.09	30.67	2013.13	29.91	2.85	2.50
1100	650	2147.18	30.67	2089.30	29.81	2.70	2.80
1100	700	2222.24	30.67	2165.48	29.72	2.55	3.10
1100	750	2297.30	30.68	2241.66	29.63	2.42	3.40
1100	800	2372.37	30.68	2317.86	29.54	2.30	3.70
1100	850	2457.43	30.67	2394.07	29.45	2.58	3.99
1100	900	2530.71	30.67	2470.29	29.36	2.39	4.28
1100	950	2604.00	30.67	2546.52	29.27	2.21	4.58
1100	1000	2677.29	30.67	2622.76	29.18	2.04	4.87
1100	1050	2750.59	30.67	2699.02	29.09	1.87	5.17
1100	1100	2823.90	30.67	2775.28	28.99	1.72	5.47
1200	0	1236.79	24.82	1200.00	31.00	2.97	24.90
1200	50	1312.64	28.01	1276.04	30.91	2.79	10.34
1200	100	1388.43	29.47	1352.10	30.82	2.62	4.58
1200	150	1464.20	30.15	1428.17	30.73	2.46	1.93
1200	200	1539.96	30.44	1504.24	30.64	2.32	0.65

Tabel A6 (lanjutan)

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
1200	250	1615.71	30.56	1580.33	30.54	2.19	0.07
1200	300	1691.48	30.62	1656.43	30.45	2.07	0.54
1200	350	1774.50	30.64	1732.54	30.36	2.36	0.92
1200	400	1850.31	30.65	1808.66	30.27	2.25	1.24
1200	450	1926.07	30.66	1884.79	30.18	2.14	1.57
1200	500	2001.89	30.67	1960.94	30.09	2.05	1.89
1200	550	2097.17	30.67	2037.09	30.00	2.86	2.19
1200	600	2172.22	30.67	2113.25	29.91	2.71	2.50
1200	650	2247.33	30.67	2189.43	29.81	2.58	2.80
1200	700	2322.39	30.67	2265.62	29.72	2.44	3.10
1200	750	2397.46	30.67	2341.81	29.63	2.32	3.40
1200	800	2472.54	30.67	2418.02	29.54	2.20	3.70
1200	850	2557.61	30.67	2494.24	29.45	2.48	3.98
1200	900	2630.90	30.67	2570.47	29.36	2.30	4.28
1200	950	2704.20	30.67	2646.71	29.27	2.13	4.58
1200	1000	2777.50	30.67	2722.96	29.18	1.96	4.87
1200	1050	2850.81	30.67	2799.23	29.09	1.81	5.17
1200	1100	2924.12	30.67	2875.50	28.99	1.66	5.46
AVERAGE ERROR						2.43	4.12

Pada Tabel A7 temperatur injeksi surfaktan divariasikan dengan konsentrasi, tekanan dan laju aliran massa injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 31 hingga 40 °C.

Tabel A7 Validasi model injeksi surfaktan terhadap variasi temperatur injeksi

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
31	0	1107.82	23.23	1071.00	31.00	3.32	33.46
31	50	1183.70	28.29	1147.03	30.91	3.10	9.25
31	100	1259.47	30.09	1223.07	30.82	2.89	2.42
31	150	1335.23	30.73	1299.13	30.73	2.70	0.00
31	200	1410.97	30.92	1375.19	30.64	2.54	0.92
31	250	1486.71	30.97	1451.27	30.54	2.38	1.37
31	300	1562.47	30.97	1527.35	30.45	2.25	1.68
31	350	1645.49	30.97	1603.45	30.36	2.55	1.95
31	400	1721.28	30.96	1679.56	30.27	2.42	2.21
31	450	1797.04	30.94	1755.68	30.18	2.30	2.47
31	500	1872.86	30.93	1831.81	30.09	2.19	2.72
31	550	1968.14	30.91	1907.95	30.00	3.06	2.94
31	600	2043.18	30.89	1984.10	29.91	2.89	3.19
31	650	2118.29	30.87	2060.26	29.81	2.74	3.43
31	700	2193.35	30.86	2136.43	29.72	2.59	3.67
31	750	2268.42	30.84	2212.62	29.63	2.46	3.92
31	800	2343.50	30.82	2288.81	29.54	2.33	4.16
31	850	2428.58	30.80	2365.02	29.45	2.62	4.39
31	900	2501.87	30.78	2441.24	29.36	2.42	4.63
31	950	2575.17	30.77	2517.47	29.27	2.24	4.87
31	1000	2648.47	30.75	2593.71	29.18	2.07	5.12

Tabel A7 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
31	1050	2721.79	30.73	2669.96	29.09	1.90	5.36
31	1100	2795.11	30.72	2746.22	28.99	1.75	5.60
32	0	1107.81	23.90	1071.00	32.00	3.32	33.90
32	50	1183.66	29.16	1147.00	31.91	3.10	9.42
32	100	1259.40	31.00	1223.00	31.82	2.89	2.62
32	150	1335.12	31.63	1299.02	31.73	2.70	0.30
32	200	1410.83	31.79	1375.05	31.64	2.54	0.50
32	250	1486.55	31.81	1451.09	31.54	2.39	0.83
32	300	1562.28	31.79	1527.14	31.45	2.25	1.05
32	350	1645.26	31.73	1603.20	31.36	2.56	1.15
32	400	1721.04	31.67	1679.27	31.27	2.43	1.26
32	450	1796.77	31.62	1755.35	31.18	2.31	1.37
32	500	1872.57	31.56	1831.45	31.09	2.20	1.49
32	550	1967.82	31.49	1907.55	31.00	3.06	1.55
32	600	2042.84	31.43	1983.67	30.91	2.90	1.66
32	650	2117.93	31.37	2059.79	30.82	2.75	1.78
32	700	2192.98	31.32	2135.93	30.73	2.60	1.89
32	750	2268.03	31.26	2212.08	30.63	2.47	2.01
32	800	2343.10	31.20	2288.24	30.54	2.34	2.12
32	850	2428.16	31.14	2364.41	30.45	2.63	2.20
32	900	2501.44	31.08	2440.59	30.36	2.43	2.32
32	950	2574.73	31.03	2516.78	30.27	2.25	2.45
32	1000	2648.03	30.97	2592.98	30.18	2.08	2.57
32	1050	2721.34	30.92	2669.20	30.09	1.92	2.69
32	1100	2794.66	30.86	2745.42	30.00	1.76	2.81
33	0	1107.79	24.57	1071.00	33.00	3.32	34.31

Tabel A7 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
33	50	1183.62	30.02	1146.96	32.91	3.10	9.63
33	100	1259.33	31.91	1222.93	32.82	2.89	2.83
33	150	1335.02	32.53	1298.91	32.73	2.70	0.59
33	200	1410.70	32.67	1374.90	32.64	2.54	0.10
33	250	1486.39	32.65	1450.91	32.55	2.39	0.33
33	300	1562.08	32.58	1526.92	32.45	2.25	0.37
33	350	1645.04	32.48	1602.94	32.36	2.56	0.34
33	400	1720.79	32.38	1678.98	32.27	2.43	0.33
33	450	1796.50	32.29	1755.03	32.18	2.31	0.32
33	500	1872.27	32.19	1831.08	32.09	2.20	0.31
33	550	1967.50	32.07	1907.15	32.00	3.07	0.21
33	600	2042.51	31.97	1983.23	31.91	2.90	0.20
33	650	2117.57	31.88	2059.32	31.82	2.75	0.18
33	700	2192.60	31.78	2135.42	31.73	2.61	0.17
33	750	2267.65	31.69	2211.54	31.64	2.47	0.16
33	800	2342.70	31.59	2287.66	31.55	2.35	0.15
33	850	2427.74	31.48	2363.79	31.45	2.63	0.09
33	900	2501.02	31.39	2439.94	31.36	2.44	0.08
33	950	2574.30	31.29	2516.09	31.27	2.26	0.07
33	1000	2647.59	31.20	2592.26	31.18	2.09	0.06
33	1050	2720.89	31.11	2668.44	31.09	1.93	0.06
33	1100	2794.20	31.02	2744.63	31.00	1.77	0.05
34	0	1107.78	25.24	1071.00	34.00	3.32	34.70
34	50	1183.57	30.89	1146.92	33.91	3.10	9.78
34	100	1259.26	32.83	1222.86	33.82	2.89	3.01
34	150	1334.92	33.44	1298.80	33.73	2.71	0.87

Tabel A7 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
34	200	1410.56	33.54	1374.76	33.64	2.54	0.29
34	250	1486.22	33.49	1450.73	33.55	2.39	0.17
34	300	1561.89	33.37	1526.70	33.46	2.25	0.25
34	350	1644.82	33.23	1602.69	33.37	2.56	0.40
34	400	1720.54	33.10	1678.69	33.27	2.43	0.53
34	450	1796.23	32.96	1754.70	33.18	2.31	0.67
34	500	1871.98	32.83	1830.72	33.09	2.20	0.81
34	550	1967.17	32.66	1906.76	33.00	3.07	1.06
34	600	2042.16	32.52	1982.80	32.91	2.91	1.20
34	650	2117.21	32.39	2058.85	32.82	2.76	1.33
34	700	2192.23	32.25	2134.92	32.73	2.61	1.47
34	750	2267.25	32.12	2210.99	32.64	2.48	1.62
34	800	2342.29	31.99	2287.08	32.55	2.36	1.76
34	850	2427.32	31.83	2363.18	32.46	2.64	1.97
34	900	2500.58	31.70	2439.29	32.37	2.45	2.10
34	950	2573.86	31.57	2515.41	32.28	2.27	2.24
34	1000	2647.14	31.44	2591.54	32.18	2.10	2.38
34	1050	2720.43	31.31	2667.68	32.09	1.94	2.52
34	1100	2793.74	31.18	2743.83	32.00	1.79	2.65
35	0	1107.76	25.91	1071.00	35.00	3.32	35.07
35	50	1183.53	31.76	1146.89	34.91	3.10	9.92
35	100	1259.19	33.74	1222.79	34.82	2.89	3.19
35	150	1334.81	34.34	1298.69	34.73	2.71	1.12
35	200	1410.43	34.42	1374.61	34.64	2.54	0.64
35	250	1486.05	34.32	1450.54	34.55	2.39	0.66
35	300	1561.69	34.17	1526.49	34.46	2.25	0.84

Tabel A7 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
35	250	1486.05	34.32	1450.54	34.55	2.39	0.66
35	300	1561.69	34.17	1526.49	34.46	2.25	0.84
35	350	1644.59	33.99	1602.44	34.37	2.56	1.11
35	400	1720.29	33.82	1678.40	34.28	2.43	1.36
35	450	1795.95	33.64	1754.38	34.19	2.32	1.62
35	500	1871.68	33.47	1830.36	34.10	2.21	1.88
35	550	1966.85	33.25	1906.36	34.00	3.08	2.28
35	600	2041.82	33.07	1982.36	33.91	2.91	2.54
35	650	2116.85	32.90	2058.38	33.82	2.76	2.81
35	700	2191.85	32.73	2134.41	33.73	2.62	3.07
35	750	2266.86	32.55	2210.45	33.64	2.49	3.34
35	800	2341.89	32.38	2286.50	33.55	2.36	3.62
35	850	2426.90	32.18	2362.56	33.46	2.65	3.97
35	900	2500.15	32.01	2438.63	33.37	2.46	4.24
35	950	2573.41	31.84	2514.72	33.28	2.28	4.51
35	1000	2646.69	31.67	2590.81	33.19	2.11	4.78
35	1050	2719.98	31.50	2666.92	33.10	1.95	5.06
35	1100	2793.27	31.34	2743.03	33.01	1.80	5.33
36	0	1107.75	26.58	1071.00	36.00	3.32	35.42
36	50	1183.49	32.79	1146.85	35.91	3.10	9.53
36	100	1259.10	34.78	1222.71	35.82	2.89	2.99
36	150	1334.69	35.33	1298.59	35.73	2.71	1.14
36	200	1410.28	35.36	1374.47	35.64	2.54	0.79
36	250	1485.87	35.23	1450.36	35.55	2.39	0.91
36	300	1561.48	35.05	1526.27	35.46	2.25	1.16
36	350	1644.35	34.84	1602.19	35.37	2.56	1.51

Tabel A7 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
36	400	1720.01	34.65	1678.11	35.28	2.44	1.82
36	450	1795.65	34.45	1754.05	35.19	2.32	2.14
36	500	1871.35	34.26	1830.00	35.10	2.21	2.46
36	550	1966.48	34.01	1905.96	35.01	3.08	2.94
36	600	2041.43	33.81	1981.93	34.92	2.91	3.27
36	650	2116.43	33.62	2057.91	34.83	2.77	3.60
36	700	2191.41	33.42	2133.90	34.74	2.62	3.93
36	750	2266.40	33.23	2209.91	34.65	2.49	4.27
36	800	2341.40	33.03	2285.92	34.56	2.37	4.61
36	850	2426.39	32.81	2361.95	34.46	2.66	5.04
36	900	2499.62	32.62	2437.98	34.37	2.47	5.38
36	950	2572.86	32.43	2514.03	34.28	2.29	5.72
36	1000	2646.12	32.24	2590.09	34.19	2.12	6.07
36	1050	2719.39	32.05	2666.16	34.10	1.96	6.41
36	1100	2792.67	31.86	2742.24	34.01	1.81	6.76
37	0	1107.73	27.26	1071.00	37.00	3.32	35.75
37	50	1183.45	33.66	1146.82	36.91	3.10	9.65
37	100	1259.03	35.70	1222.64	36.82	2.89	3.15
37	150	1334.59	36.23	1298.48	36.73	2.71	1.38
37	200	1410.14	36.23	1374.33	36.64	2.54	1.12
37	250	1485.70	36.07	1450.18	36.55	2.39	1.35
37	300	1561.28	35.85	1526.05	36.46	2.26	1.71
37	350	1644.12	35.60	1601.93	36.37	2.57	2.17
37	400	1719.76	35.36	1677.82	36.28	2.44	2.60
37	450	1795.37	35.13	1753.73	36.19	2.32	3.03
37	500	1871.05	34.89	1829.64	36.10	2.21	3.47

Tabel A7 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
37	550	1966.16	34.60	1905.56	36.01	3.08	4.09
37	600	2041.08	34.36	1981.50	35.92	2.92	4.54
37	650	2116.07	34.13	2057.44	35.83	2.77	4.99
37	700	2191.03	33.89	2133.40	35.74	2.63	5.45
37	750	2266.00	33.66	2209.37	35.65	2.50	5.91
37	800	2340.99	33.43	2285.34	35.56	2.38	6.38
37	850	2425.97	33.16	2361.33	35.47	2.66	6.97
37	900	2499.19	32.93	2437.33	35.38	2.47	7.44
37	950	2572.42	32.70	2513.34	35.29	2.30	7.92
37	1000	2645.67	32.47	2589.36	35.20	2.13	8.40
37	1050	2718.93	32.24	2665.40	35.11	1.97	8.88
37	1100	2792.20	32.02	2741.44	35.02	1.82	9.38
38	0	1107.72	27.93	1071.00	38.00	3.31	36.07
38	50	1183.40	34.53	1146.78	37.91	3.09	9.78
38	100	1258.96	36.61	1222.57	37.82	2.89	3.30
38	150	1334.48	37.14	1298.37	37.73	2.71	1.60
38	200	1410.00	37.10	1374.18	37.64	2.54	1.46
38	250	1485.54	36.90	1450.00	37.55	2.39	1.77
38	300	1561.09	36.65	1525.84	37.46	2.26	2.23
38	350	1643.89	36.35	1601.68	37.37	2.57	2.81
38	400	1719.51	36.08	1677.53	37.29	2.44	3.34
38	450	1795.10	35.80	1753.40	37.20	2.32	3.89
38	500	1870.75	35.53	1829.28	37.11	2.22	4.44
38	550	1965.83	35.18	1905.16	37.02	3.09	5.21
38	600	2040.74	34.91	1981.06	36.93	2.92	5.78
38	650	2115.71	34.64	2056.97	36.84	2.78	6.35

Tabel A7 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
38	700	2190.65	34.36	2132.89	36.75	2.64	6.93
38	750	2265.61	34.09	2208.82	36.66	2.51	7.52
38	800	2340.58	33.82	2284.76	36.57	2.38	8.12
38	850	2425.54	33.51	2360.72	36.48	2.67	8.86
38	900	2498.75	33.24	2436.68	36.39	2.48	9.47
38	950	2571.97	32.97	2512.65	36.30	2.31	10.08
38	1000	2645.21	32.71	2588.64	36.21	2.14	10.70
38	1050	2718.47	32.44	2664.64	36.12	1.98	11.33
38	1100	2791.74	32.17	2740.64	36.03	1.83	11.97
39	0	1107.71	28.60	1071.00	39.00	3.31	36.37
39	50	1183.36	35.40	1146.74	38.91	3.09	9.91
39	100	1258.88	37.53	1222.50	38.82	2.89	3.45
39	150	1334.37	38.04	1298.26	38.73	2.71	1.82
39	200	1409.86	37.98	1374.04	38.65	2.54	1.75
39	250	1485.37	37.74	1449.82	38.56	2.39	2.17
39	300	1560.89	37.44	1525.62	38.47	2.26	2.73
39	350	1643.67	37.11	1601.43	38.38	2.57	3.43
39	400	1719.25	36.79	1677.25	38.29	2.44	4.06
39	450	1794.82	36.48	1753.07	38.20	2.33	4.71
39	500	1870.45	36.17	1828.92	38.11	2.22	5.38
39	550	1965.50	35.77	1904.77	38.02	3.09	6.29
39	600	2040.39	35.46	1980.63	37.93	2.93	6.98
39	650	2115.34	35.15	2056.50	37.84	2.78	7.67
39	700	2190.27	34.83	2132.38	37.75	2.64	8.38
39	750	2265.21	34.52	2208.28	37.66	2.51	9.10
39	800	2340.17	34.21	2284.18	37.57	2.39	9.83

Tabel A7 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
39	850	2425.12	33.86	2360.10	37.48	2.68	10.72
39	900	2498.32	33.55	2436.03	37.39	2.49	11.46
39	950	2571.53	33.24	2511.96	37.30	2.32	12.21
39	1000	2644.76	32.94	2587.91	37.21	2.15	12.98
39	1050	2718.01	32.64	2663.87	37.13	1.99	13.75
39	1100	2791.27	32.33	2739.84	37.04	1.84	14.54
40	0	1107.71	28.60	1071.00	40.00	3.31	39.87
40	50	1183.36	35.40	1146.71	39.91	3.10	12.74
40	100	1258.88	37.53	1222.42	39.83	2.90	6.12
40	150	1334.37	38.04	1298.15	39.74	2.71	4.46
40	200	1409.86	37.98	1373.89	39.65	2.55	4.40
40	250	1485.37	37.74	1449.64	39.56	2.41	4.83
40	300	1560.89	37.44	1525.40	39.47	2.27	5.42
40	350	1643.67	37.11	1601.17	39.38	2.59	6.14
40	400	1719.25	36.79	1676.96	39.30	2.46	6.80
40	450	1794.82	36.48	1752.75	39.21	2.34	7.47
40	500	1870.45	36.17	1828.55	39.12	2.24	8.16
40	550	1965.50	35.77	1904.37	39.03	3.11	9.11
40	600	2040.39	35.46	1980.19	38.94	2.95	9.82
40	650	2115.34	35.15	2056.03	38.85	2.80	10.54
40	700	2190.27	34.83	2131.88	38.76	2.67	11.28
40	750	2265.21	34.52	2207.73	38.67	2.54	12.02
40	800	2340.17	34.21	2283.60	38.58	2.42	12.78
40	850	2425.12	33.86	2359.48	38.50	2.71	13.70
40	900	2498.32	33.55	2435.37	38.41	2.52	14.48
40	950	2571.53	33.24	2511.27	38.32	2.34	15.25

Tabel A7 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
40	1000	2644.76	32.94	2587.19	38.23	2.18	16.05
40	1050	2718.01	32.64	2663.11	38.14	2.02	16.85
40	1100	2791.27	32.33	2739.04	38.05	1.87	17.67
AVERAGE ERROR						2.53	5.74

LAMPIRAN B Validasi Pemodelan Temperatur dan Tekanan pada *Reservoir*

Validasi model pada *reservoir* dilakukan dengan membandingkan hasil model dengan hasil simulasi pada perangkat lunak COMSOL *Multiphysics*. Pada Tabel B1, tekanan injeksi CO₂ divariasikan, laju aliran massa dan temperatur injeksi yang tetap. Nilai variasi berada diantara nilai 1071 hingga 1200 psi.

Tabel B1 Validasi model injeksi CO₂ terhadap variasi laju aliran massa injeksi

P	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
1071	0	2107.51	30.96	2107.51	30.96	0.00	0.00
1071	10	2074.54	30.90	2074.65	30.83	0.01	0.21
1071	20	2041.46	30.76	2041.67	30.75	0.01	0.02
1071	30	2008.25	30.68	2008.58	30.70	0.02	0.05
1071	40	1974.92	30.64	1975.36	30.66	0.02	0.08
1071	50	1941.46	30.61	1942.02	30.64	0.03	0.09
1071	60	1907.86	30.59	1908.54	30.62	0.04	0.09
1071	70	1874.13	30.58	1874.93	30.60	0.04	0.08
1071	80	1840.26	30.57	1841.19	30.59	0.05	0.07
1071	90	1806.23	30.57	1807.29	30.59	0.06	0.06
1071	100	1772.06	30.57	1773.25	30.58	0.07	0.05
1100	0	2152.25	30.96	2152.25	30.96	0.00	0.00
1100	10	2119.49	30.88	2119.55	30.82	0.00	0.20
1100	20	2086.62	30.74	2086.73	30.74	0.01	0.01
1100	30	2053.64	30.67	2053.80	30.69	0.01	0.06
1100	40	2020.53	30.63	2020.75	30.65	0.01	0.09
1100	50	1987.30	30.60	1987.58	30.63	0.01	0.09
1200	0	2306.55	30.97	2306.55	30.97	0.00	0.00

Tabel B1 (lanjutan)

P	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
1200	10	2274.29	30.83	2274.33	30.78	0.00	0.15
1200	20	2241.93	30.69	2242.02	30.69	0.00	0.02
1200	30	2209.47	30.62	2209.61	30.65	0.01	0.07
1200	40	2176.90	30.60	2177.09	30.62	0.01	0.07
1200	50	2144.22	30.58	2144.47	30.60	0.01	0.06
1200	60	2111.44	30.57	2111.74	30.59	0.01	0.05
1200	70	2078.54	30.57	2078.89	30.58	0.02	0.04
1200	80	2045.52	30.56	2045.94	30.57	0.02	0.04
1200	90	2012.38	30.56	2012.86	30.57	0.02	0.03
1200	100	1979.12	30.56	1979.66	30.57	0.03	0.02
AVERAGE ERROR						0.02	0.06

Pada Tabel B2 temperatur injeksi CO₂ divariasikan dengan tekanan dan laju aliran massa injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 31 hingga 40 °C.

Tabel B2 Validasi model injeksi CO₂ terhadap variasi temperatur injeksi

T	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
31	0	2107.51	30.96	2107.51	30.96	0.00	0.00
31	10	2074.54	30.90	2074.65	30.83	0.01	0.21
31	20	2041.46	30.76	2041.67	30.75	0.01	0.02
31	30	2008.25	30.68	2008.58	30.70	0.02	0.05
31	40	1974.92	30.64	1975.36	30.66	0.02	0.08

Tabel B2 (lanjutan)

T	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
31	50	1941.46	30.61	1942.02	30.64	0.03	0.09
31	60	1907.86	30.59	1908.54	30.62	0.04	0.09
31	70	1874.13	30.58	1874.93	30.60	0.04	0.08
31	80	1840.26	30.57	1841.19	30.59	0.05	0.07
31	90	1806.23	30.57	1807.29	30.59	0.06	0.06
31	100	1772.06	30.57	1773.25	30.58	0.07	0.05
32	0	2106.27	31.87	2106.27	31.87	0.00	0.00
32	10	2073.35	31.49	2073.41	31.74	0.00	0.78
32	20	2040.32	31.07	2040.43	31.62	0.01	1.75
32	30	2007.16	30.87	2007.33	31.51	0.01	2.07
32	40	1973.88	30.75	1974.11	31.41	0.01	2.16
32	50	1940.47	30.68	1940.76	31.33	0.01	2.10
32	60	1906.93	30.64	1907.28	31.25	0.02	2.01
32	70	1873.25	30.61	1873.66	31.18	0.02	1.87
32	80	1839.42	30.59	1839.91	31.12	0.03	1.73
32	90	1805.45	30.58	1806.01	31.06	0.03	1.58
32	100	1771.33	30.57	1771.96	31.01	0.04	1.44
33	0	2105.03	32.78	2105.03	32.78	0.00	0.00
33	10	2072.11	31.81	2072.17	32.53	0.00	2.28
33	20	2039.07	31.22	2039.18	32.31	0.01	3.49
33	30	2005.91	30.96	2006.08	32.12	0.01	3.77
33	40	1972.63	30.78	1972.85	31.96	0.01	3.82
33	50	1939.21	30.71	1939.50	31.81	0.01	3.57
33	60	1905.66	30.66	1906.01	31.68	0.02	3.34
33	70	1871.98	30.62	1872.39	31.56	0.02	3.07
33	80	1838.15	30.60	1838.63	31.46	0.03	2.81

Tabel B2 (lanjutan)

T	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
33	90	1804.17	30.59	1804.73	31.37	0.03	2.56
33	100	1770.04	30.58	1770.68	31.29	0.04	2.32
34	0	2103.79	33.70	2103.79	33.70	0.00	0.00
34	10	2070.87	31.93	2070.92	33.31	0.00	4.31
34	20	2037.83	31.28	2037.93	32.98	0.01	5.43
34	30	2004.66	30.99	2004.83	32.70	0.01	5.52
34	40	1971.37	30.78	1971.60	32.46	0.01	5.44
34	50	1937.95	30.73	1938.24	32.25	0.01	4.94
34	60	1904.39	30.66	1904.75	32.06	0.02	4.57
34	70	1870.70	30.63	1871.12	31.90	0.02	4.16
34	80	1836.87	30.60	1837.36	31.76	0.03	3.78
34	90	1802.89	30.59	1803.45	31.64	0.03	3.42
34	100	1768.75	30.58	1769.39	31.52	0.04	3.09
35	0	2102.56	34.61	2102.56	34.61	0.00	0.00
35	10	2069.63	32.29	2069.68	34.05	0.00	5.43
35	20	2036.58	31.25	2036.69	33.59	0.01	7.49
35	30	2003.41	30.98	2003.57	33.22	0.01	7.23
35	40	1970.11	30.81	1970.34	32.90	0.01	6.78
35	50	1936.69	30.72	1936.98	32.63	0.01	6.22
35	60	1903.13	30.66	1903.48	32.40	0.02	5.67
35	70	1869.43	30.63	1869.85	32.20	0.02	5.12
35	80	1835.59	30.60	1836.08	32.02	0.03	4.63
35	90	1801.60	30.59	1802.16	31.86	0.03	4.16
35	100	1767.46	30.58	1768.10	31.72	0.04	3.75
36	0	2101.32	34.61	2101.32	35.52	0.00	2.64
36	10	2068.38	31.26	2068.44	34.74	0.00	11.12

Tabel B2 (lanjutan)

T	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
36	20	2035.33	31.10	2035.44	34.15	0.01	9.79
36	30	2002.16	30.89	2002.32	33.67	0.01	9.02
36	40	1968.85	30.76	1969.08	33.28	0.01	8.20
36	50	1935.42	30.69	1935.71	32.96	0.01	7.39
36	60	1901.86	30.64	1902.21	32.68	0.02	6.65
36	70	1868.16	30.61	1868.58	32.44	0.02	5.96
36	80	1834.31	30.59	1834.80	32.23	0.03	5.35
36	90	1800.32	30.58	1800.88	32.05	0.03	4.79
36	100	1766.17	30.58	1766.81	31.89	0.04	4.29
37	0	2100.08	36.44	2100.08	36.44	0.00	0.00
37	10	2067.14	30.62	2067.19	35.36	0.00	15.47
37	20	2034.08	30.39	2034.19	34.61	0.01	13.89
37	30	2000.90	30.44	2001.07	34.05	0.01	11.87
37	40	1967.60	30.48	1967.82	33.59	0.01	10.21
37	50	1934.16	30.51	1934.45	33.22	0.01	8.88
37	60	1900.59	30.53	1900.94	32.90	0.02	7.77
37	70	1866.88	30.54	1867.30	32.63	0.02	6.85
37	80	1833.03	30.55	1833.52	32.39	0.03	6.05
37	90	1799.03	30.55	1799.60	32.19	0.03	5.37
37	100	1764.88	30.55	1765.52	32.01	0.04	4.78
38	0	2098.84	37.35	2098.84	37.35	0.00	0.00
38	10	2065.89	32.20	2065.95	35.84	0.00	11.32
38	20	2032.83	31.33	2032.94	34.96	0.01	11.59
38	30	1999.65	31.02	1999.81	34.32	0.01	10.64
38	40	1966.34	30.84	1966.56	33.81	0.01	9.64

Tabel B2 (lanjutan)

T	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
38	50	1932.90	30.74	1933.19	33.40	0.01	8.65
38	60	1899.32	30.67	1899.68	33.05	0.02	7.76
38	70	1865.61	30.63	1866.03	32.76	0.02	6.94
38	80	1831.75	30.61	1832.24	32.51	0.03	6.21
38	90	1797.75	30.59	1798.31	32.29	0.03	5.55
38	100	1763.59	30.58	1764.23	32.10	0.04	4.97
39	0	2097.59	38.27	2097.59	38.27	0.00	0.00
39	10	2064.65	32.20	2064.70	36.07	0.00	12.03
39	20	2031.58	31.41	2031.69	35.12	0.01	11.82
39	30	1998.39	31.06	1998.56	34.44	0.01	10.88
39	40	1965.08	30.86	1965.31	33.91	0.01	9.87
39	50	1931.63	30.76	1931.92	33.48	0.01	8.85
39	60	1898.05	30.68	1898.41	33.12	0.02	7.95
39	70	1864.33	30.64	1864.76	32.82	0.02	7.10
39	80	1830.47	30.61	1830.96	32.56	0.03	6.35
39	90	1796.46	30.59	1797.03	32.33	0.03	5.68
39	100	1762.30	30.58	1762.94	32.14	0.04	5.08
40	0	2096.35	39.19	2096.35	39.19	0.00	0.00
40	10	2063.40	32.26	2063.46	35.66	0.00	10.55
40	20	2030.33	31.43	2030.44	34.83	0.01	10.82
40	30	1997.14	31.07	1997.30	34.22	0.01	10.13
40	40	1963.82	30.87	1964.05	33.73	0.01	9.28
40	50	1930.37	30.76	1930.66	33.33	0.02	8.37
40	60	1896.78	30.68	1897.14	33.00	0.02	7.53
40	70	1863.06	30.64	1863.48	32.71	0.02	6.75

Tabel B2 (lanjutan)

T	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
40	90	1795.18	30.60	1795.74	32.25	0.03	5.42
40	100	1761.01	30.58	1761.65	32.07	0.04	4.86
AVERAGE ERROR						0.02	5.14

Pada Tabel B3 laju aliran massa injeksi CO₂ divariasikan dengan tekanan dan temperatur injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 0.2 hingga 0.5 kg/s.

Tabel B3 Validasi model injeksi CO₂ terhadap variasi laju aliran massa injeksi

m	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
0.2	0	2161.30	30.98	2161.30	30.98	0.00	0.00
0.2	10	2139.80	30.81	2139.83	30.81	0.00	0.03
0.2	20	2118.26	30.67	2118.31	30.71	0.00	0.15
0.2	30	2096.67	30.61	2096.75	30.66	0.00	0.16
0.2	40	2075.03	30.58	2075.13	30.63	0.00	0.14
0.2	50	2053.34	30.57	2053.47	30.61	0.01	0.11
0.2	60	2031.60	30.56	2031.75	30.59	0.01	0.08
0.2	70	2009.80	30.56	2009.99	30.58	0.01	0.06
0.2	80	1987.95	30.56	1988.16	30.58	0.01	0.05
0.2	90	1966.05	30.56	1966.29	30.57	0.01	0.03
0.2	100	1944.09	30.56	1944.36	30.57	0.01	0.02
0.3	0	2107.50	31.00	2107.50	30.97	0.00	0.09
0.3	10	2078.56	30.97	2074.59	31.36	0.19	1.25

Tabel B3 (lanjutan)

m	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
0.3	20	2049.52	30.83	2041.56	31.33	0.39	1.60
0.3	30	2020.39	30.75	2008.41	31.93	0.59	3.82
0.3	40	1991.16	30.69	1975.14	31.65	0.80	3.11
0.3	50	1961.83	30.66	1941.74	31.80	1.02	3.73
0.3	60	1932.41	30.63	1908.20	31.75	1.25	3.68
0.3	70	1902.87	30.61	1874.53	31.72	1.49	3.62
0.3	80	1873.24	30.59	1840.71	31.66	1.74	3.48
0.3	90	1843.49	30.58	1806.75	31.58	1.99	3.25
0.3	100	1813.63	30.58	1772.64	31.47	2.26	2.91
0.4	0	2059.20	30.96	2059.20	30.96	0.00	0.00
0.4	10	2015.71	30.95	2015.80	30.85	0.00	0.30
0.4	20	1972.01	30.82	1972.19	30.78	0.01	0.14
0.4	30	1928.08	30.75	1928.35	30.73	0.01	0.06
0.4	40	1883.92	30.69	1884.29	30.69	0.02	0.00
0.4	50	1839.51	30.66	1840.00	30.67	0.03	0.03
0.4	60	1794.85	30.63	1795.45	30.64	0.03	0.05
0.4	70	1749.93	30.61	1750.65	30.63	0.04	0.06
0.4	80	1704.73	30.60	1705.58	30.62	0.05	0.07
0.4	90	1659.23	30.59	1660.22	30.61	0.06	0.06
0.4	100	1613.44	30.58	1614.57	30.60	0.07	0.06
0.5	0	2009.83	30.96	2009.83	30.96	0.00	0.00
0.5	10	1955.14	30.97	1955.27	30.87	0.01	0.31
0.5	20	1900.11	30.86	1900.37	30.80	0.01	0.17
0.5	30	1844.70	30.80	1845.11	30.76	0.02	0.14
0.5	40	1788.90	30.74	1789.47	30.72	0.03	0.06

Tabel B3 (lanjutan)

m	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
0.5	50	1732.68	30.70	1733.42	30.69	0.04	0.04
0.5	60	1676.02	30.67	1676.94	30.67	0.06	0.01
0.5	70	1618.89	30.64	1620.02	30.65	0.07	0.03
0.5	80	1561.26	30.62	1562.61	30.64	0.09	0.06
0.5	90	1503.10	30.61	1504.68	30.63	0.11	0.06
0.5	100	1444.37	30.60	1446.21	30.62	0.13	0.06
AVERAGE ERROR						0.23	0.75

Pada Tabel B4 laju aliran massa injeksi surfaktan divariasikan dengan tekanan, temperatur dan konsentrasi injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 0.2 hingga 0.5 kg/s

Tabel B4 Validasi model injeksi surfaktan terhadap variasi laju aliran massa injeksi

m	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
0.2	0	2743.41	28.97	2743.41	28.97	0.00	0.00
0.2	10	2702.40	29.27	2702.42	29.08	0.00	0.66
0.2	20	2661.34	29.27	2661.39	29.18	0.00	0.30
0.2	30	2620.24	29.24	2620.32	29.28	0.00	0.12
0.2	40	2579.09	29.29	2579.21	29.37	0.00	0.25
0.2	50	2537.91	29.29	2538.05	29.45	0.01	0.54
0.2	60	2496.68	29.27	2496.85	29.53	0.01	0.86
0.2	70	2455.40	29.24	2455.60	29.60	0.01	1.20
0.2	80	2414.09	29.26	2414.32	29.66	0.01	1.39

Tabel B4 (lanjutan)

m	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
0.2	90	2372.73	29.24	2372.99	29.72	0.01	1.66
0.2	100	2331.33	29.27	2331.61	29.78	0.01	1.76
0.3	0	2746.05	29.00	2746.05	29.00	0.00	0.00
0.3	10	2705.04	29.30	2705.07	29.12	0.00	0.59
0.3	20	2663.98	29.30	2664.04	29.24	0.00	0.19
0.3	30	2622.89	29.27	2622.97	29.35	0.00	0.27
0.3	40	2581.74	29.32	2581.86	29.45	0.00	0.45
0.3	50	2540.56	29.31	2540.70	29.54	0.01	0.77
0.3	60	2499.33	29.30	2499.50	29.63	0.01	1.11
0.3	70	2458.06	29.27	2458.26	29.70	0.01	1.49
0.3	80	2416.75	29.28	2416.98	29.78	0.01	1.69
0.3	90	2375.39	29.26	2375.65	29.84	0.01	1.98
0.3	100	2333.99	29.29	2334.28	29.91	0.01	2.10
0.4	0	2750.44	29.03	2750.44	29.03	0.00	0.00
0.4	10	2713.43	29.32	2709.46	29.13	0.15	0.63
0.4	20	2676.38	29.32	2668.44	29.23	0.30	0.29
0.4	30	2639.30	29.29	2627.38	29.32	0.45	0.11
0.4	40	2602.17	29.34	2586.27	29.41	0.61	0.24
0.4	50	2565.00	29.34	2545.12	29.49	0.78	0.52
0.4	60	2527.80	29.32	2503.92	29.56	0.94	0.82
0.4	70	2490.56	29.29	2462.69	29.63	1.12	1.16
0.4	80	2453.28	29.30	2421.41	29.69	1.30	1.34
0.4	90	2415.96	29.29	2380.08	29.75	1.48	1.60
0.4	100	2378.60	29.31	2338.72	29.81	1.68	1.70
0.5	0	2756.19	29.05	2756.19	29.05	0.00	0.00
0.5	10	2719.18	29.34	2715.21	29.16	0.15	0.62

Tabel B4 (lanjutan)

m	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
0.5	20	2682.14	29.34	2674.20	29.25	0.30	0.29
0.5	30	2645.06	29.31	2633.14	29.34	0.45	0.11
0.5	40	2607.94	29.36	2592.04	29.43	0.61	0.24
0.5	50	2570.78	29.36	2550.89	29.51	0.77	0.51
0.5	60	2533.58	29.34	2509.71	29.58	0.94	0.81
0.5	70	2496.35	29.31	2468.48	29.65	1.12	1.14
0.5	80	2459.07	29.32	2427.20	29.71	1.30	1.31
0.5	90	2421.76	29.31	2385.88	29.77	1.48	1.57
0.5	100	2384.41	29.33	2344.52	29.82	1.67	1.67
AVERAGE ERROR						0.40	0.82

Pada Tabel B5 tekanan injeksi surfaktan divariasikan dengan laju aliran massa, temperatur dan konsentrasi injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 1071 hingga 1200 psi.

Tabel B5 Validasi model injeksi surfaktan terhadap variasi tekanan injeksi

P	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
1071	0	2746.21	29.00	2746.21	29.00	0.00	0.00
1071	10	2709.20	29.30	2705.23	29.11	0.15	0.64
1071	20	2672.15	29.30	2664.20	29.21	0.30	0.30
1071	30	2635.05	29.27	2623.13	29.30	0.45	0.12
1071	40	2597.92	29.32	2582.02	29.39	0.61	0.25
1071	50	2560.75	29.32	2540.87	29.47	0.78	0.53

Tabel B5 (lanjutan)

P	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
1071	60	2523.55	29.30	2499.67	29.55	0.95	0.84
1071	70	2486.30	29.27	2458.43	29.62	1.12	1.18
1071	80	2449.01	29.28	2417.14	29.68	1.30	1.36
1071	90	2411.69	29.27	2375.82	29.74	1.49	1.63
1071	100	2374.33	29.29	2334.44	29.80	1.68	1.72
1100	0	2775.28	29.00	2775.28	29.00	0.00	0.00
1100	10	2738.29	29.30	2734.32	29.11	0.14	0.64
1100	20	2701.27	29.30	2693.33	29.21	0.29	0.30
1100	30	2664.21	29.27	2652.29	29.30	0.45	0.12
1100	40	2627.11	29.32	2611.21	29.39	0.61	0.25
1100	50	2589.97	29.32	2570.08	29.47	0.77	0.53
1100	60	2552.79	29.30	2528.92	29.55	0.94	0.84
1100	70	2515.58	29.27	2487.70	29.62	1.11	1.18
1100	80	2478.32	29.28	2446.45	29.68	1.29	1.36
1100	90	2441.03	29.27	2405.15	29.74	1.47	1.63
1100	100	2403.69	29.29	2363.81	29.80	1.66	1.73
1200	0	2875.50	29.00	2875.50	29.00	0.00	0.00
1200	10	2838.62	29.30	2834.65	29.11	0.14	0.64
1200	20	2801.70	29.30	2793.76	29.21	0.28	0.30
1200	30	2764.74	29.27	2752.82	29.30	0.43	0.12
1200	40	2727.75	29.32	2711.85	29.39	0.58	0.25
1200	50	2690.71	29.32	2670.83	29.47	0.74	0.53
1200	60	2653.64	29.30	2629.77	29.55	0.90	0.84
1200	70	2616.53	29.27	2588.66	29.62	1.07	1.18
1200	80	2579.38	29.28	2547.51	29.68	1.24	1.36

Tabel B5 (lanjutan)

P	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
1200	90	2542.19	29.26	2506.32	29.74	1.41	1.63
1200	100	2504.96	29.29	2465.09	29.80	1.59	1.73
AVERAGE ERROR						0.79	0.78

Pada Tabel B6 temperatur injeksi surfaktan divariasikan dengan tekanan, laju aliran massa dan konsentrasi injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 31 hingga 40 °C

Tabel B6 Validasi model injeksi surfaktan terhadap variasi temperatur injeksi

T	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
31	0	2746.21	29.00	2746.21	29.00	0.00	0.00
31	10	2709.20	29.30	2705.23	29.11	0.15	0.64
31	20	2672.15	29.30	2664.20	29.21	0.30	0.30
31	30	2635.05	29.27	2623.13	29.30	0.45	0.12
31	40	2597.92	29.32	2582.02	29.39	0.61	0.25
31	50	2560.75	29.31	2540.87	29.47	0.78	0.53
31	60	2523.55	29.30	2499.67	29.55	0.95	0.84
31	70	2486.30	29.27	2458.43	29.62	1.12	1.18
31	80	2449.01	29.28	2417.14	29.68	1.30	1.36
31	90	2411.69	29.26	2375.82	29.74	1.49	1.63
31	100	2374.33	29.29	2334.44	29.80	1.68	1.73
32	0	2745.42	30.00	2745.42	30.00	0.00	0.00
32	10	2708.40	30.11	2704.43	30.04	0.15	0.22

Tabel B6 (lanjutan)

T	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
32	20	2671.35	30.11	2663.41	30.08	0.30	0.10
32	30	2634.26	30.10	2622.34	30.11	0.45	0.04
32	40	2597.12	30.12	2581.22	30.14	0.61	0.09
32	50	2559.95	30.12	2540.07	30.17	0.78	0.18
32	60	2522.74	30.11	2498.87	30.20	0.95	0.29
32	70	2485.50	30.10	2457.63	30.22	1.12	0.41
32	80	2448.21	30.10	2416.34	30.25	1.30	0.47
32	90	2410.88	30.10	2375.01	30.27	1.49	0.56
32	100	2373.52	30.11	2333.64	30.29	1.68	0.60
33	0	2744.62	31.01	2744.62	31.01	0.00	0.00
33	10	2707.61	30.92	2703.64	30.98	0.15	0.18
33	20	2670.55	30.92	2662.61	30.95	0.30	0.08
33	30	2633.46	30.93	2621.54	30.92	0.45	0.03
33	40	2596.32	30.92	2580.42	30.90	0.61	0.07
33	50	2559.15	30.92	2539.27	30.87	0.78	0.14
33	60	2521.94	30.92	2498.07	30.85	0.95	0.23
33	70	2484.70	30.93	2456.82	30.83	1.12	0.32
33	80	2447.41	30.93	2415.54	30.81	1.30	0.37
33	90	2410.08	30.93	2374.21	30.80	1.49	0.44
33	100	2372.72	30.92	2332.84	30.78	1.68	0.47
34	0	2743.83	32.01	2743.83	32.01	0.00	0.00
34	10	2706.81	31.74	2702.84	31.91	0.15	0.56
34	20	2669.75	31.74	2661.81	31.82	0.30	0.26
34	30	2632.66	31.76	2620.74	31.73	0.45	0.10
34	40	2595.53	31.72	2579.62	31.65	0.61	0.21

Tabel B6 (lanjutan)

T	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
34	50	2558.35	31.72	2538.47	31.58	0.78	0.45
34	60	2521.14	31.73	2497.27	31.51	0.95	0.72
34	70	2483.89	31.76	2456.02	31.44	1.12	1.01
34	80	2446.61	31.75	2414.73	31.38	1.30	1.17
34	90	2409.28	31.77	2373.40	31.32	1.49	1.40
34	100	2371.91	31.74	2332.03	31.27	1.68	1.48
35	0	2743.03	33.02	2743.03	33.02	0.00	0.00
35	10	2706.01	32.55	2702.04	32.85	0.15	0.92
35	20	2668.95	32.55	2661.01	32.69	0.30	0.43
35	30	2631.86	32.59	2619.94	32.54	0.45	0.16
35	40	2594.73	32.52	2578.82	32.40	0.61	0.35
35	50	2557.55	32.52	2537.67	32.28	0.78	0.75
35	60	2520.34	32.55	2496.46	32.16	0.95	1.19
35	70	2483.09	32.59	2455.22	32.05	1.12	1.67
35	80	2445.80	32.57	2413.93	31.95	1.30	1.92
35	90	2408.47	32.60	2372.60	31.85	1.49	2.30
35	100	2371.11	32.56	2331.23	31.76	1.68	2.44
36	0	2742.23	34.02	2742.23	34.02	0.00	0.00
36	10	2705.21	33.36	2701.24	33.78	0.15	1.27
36	20	2668.16	33.36	2660.21	33.56	0.30	0.59
36	30	2631.06	33.43	2619.14	33.35	0.45	0.22
36	40	2593.93	33.32	2578.02	33.16	0.61	0.48
36	50	2556.75	33.32	2536.86	32.98	0.78	1.03
36	60	2519.54	33.36	2495.66	32.81	0.95	1.63
36	70	2482.29	33.42	2454.42	32.66	1.12	2.29
36	80	2445.00	33.39	2413.13	32.51	1.30	2.64

Tabel B6 (lanjutan)

T	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
36	90	2407.67	33.43	2371.80	32.38	1.49	3.16
36	100	2370.30	33.37	2330.42	32.25	1.68	3.36
37	0	2741.43	35.03	2741.43	35.03	0.00	0.00
37	10	2704.42	34.17	2700.45	34.72	0.15	1.60
37	20	2667.36	34.18	2659.41	34.43	0.30	0.74
37	30	2630.26	34.26	2618.34	34.16	0.45	0.27
37	40	2593.12	34.12	2577.22	33.91	0.61	0.60
37	50	2555.95	34.12	2536.06	33.68	0.78	1.29
37	60	2518.74	34.17	2494.86	33.47	0.95	2.05
37	70	2481.49	34.25	2453.61	33.27	1.12	2.88
37	80	2444.19	34.22	2412.32	33.08	1.30	3.33
37	90	2406.86	34.27	2370.99	32.91	1.49	3.98
37	100	2369.50	34.19	2329.62	32.74	1.68	4.23
38	0	2740.64	36.04	2740.64	36.04	0.00	0.00
38	10	2703.62	34.99	2699.65	35.66	0.15	1.92
38	20	2666.56	34.99	2658.62	35.30	0.30	0.89
38	30	2629.46	35.09	2617.54	34.98	0.45	0.32
38	40	2592.32	34.92	2576.42	34.67	0.61	0.72
38	50	2555.15	34.93	2535.26	34.39	0.78	1.54
38	60	2517.93	34.98	2494.06	34.12	0.95	2.46
38	70	2480.68	35.09	2452.81	33.88	1.12	3.45
38	80	2443.39	35.04	2411.52	33.65	1.30	3.98
38	90	2406.06	35.10	2370.19	33.43	1.49	4.76
38	100	2368.69	35.01	2328.81	33.24	1.68	5.06
39	0	2739.84	37.05	2739.84	37.05	0.00	0.00
39	10	2702.82	35.80	2698.85	36.60	0.15	2.23

Pada Tabel B7 konsentrasi injeksi surfaktan divariasikan dengan tekanan, temperatur dan laju aliran massa injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 0.5 hingga 0.9 wt%

Tabel B7 Validasi model injeksi surfaktan terhadap variasi laju aliran massa injeksi

x	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
0.5	0	2746.21	29.00	2746.21	29.00	0.00	0.00
0.5	10	2709.20	29.30	2705.23	29.11	0.15	0.64
0.5	20	2672.15	29.30	2664.20	29.21	0.30	0.30
0.5	30	2635.05	29.27	2623.13	29.30	0.45	0.12
0.5	40	2597.92	29.32	2582.02	29.39	0.61	0.25
0.5	50	2560.75	29.32	2540.87	29.47	0.78	0.53
0.5	60	2523.55	29.30	2499.67	29.55	0.95	0.84
0.5	70	2486.30	29.27	2458.43	29.62	1.12	1.18
0.5	80	2449.01	29.28	2417.14	29.68	1.30	1.36
0.5	90	2411.69	29.26	2375.82	29.74	1.49	1.63
0.5	100	2374.33	29.29	2334.44	29.80	1.68	1.73
0.6	0	2749.95	29.00	2749.95	29.00	0.00	0.00
0.6	10	2710.63	29.32	2708.97	29.11	0.06	0.71
0.6	20	2671.26	29.32	2667.95	29.21	0.12	0.36
0.6	30	2631.85	29.29	2626.88	29.30	0.19	0.06
0.6	40	2592.41	29.34	2585.77	29.39	0.26	0.18
0.6	50	2552.92	29.34	2544.62	29.47	0.33	0.45
0.6	60	2513.39	29.32	2503.43	29.55	0.40	0.77
0.6	70	2473.82	29.29	2462.19	29.62	0.47	1.12
0.6	80	2434.21	29.30	2420.91	29.68	0.55	1.30
0.6	90	2394.55	29.28	2379.59	29.74	0.63	1.57
0.6	100	2354.86	29.31	2338.22	29.80	0.71	1.66

Tabel B7 (lanjutan)

x	Jarak	COMSOL		Model		% Error	
		P	T	P	T	P	T
0.7	0	2751.06	29.00	2751.06	29.00	0.00	0.00
0.7	10	2713.42	29.30	2710.08	29.11	0.12	0.64
0.7	20	2675.74	29.30	2669.06	29.21	0.25	0.30
0.7	30	2638.03	29.27	2627.99	29.30	0.38	0.12
0.7	40	2600.27	29.32	2586.89	29.39	0.51	0.25
0.7	50	2562.48	29.32	2545.74	29.47	0.65	0.53
0.7	60	2524.64	29.30	2504.54	29.55	0.80	0.84
0.7	70	2486.77	29.27	2463.31	29.62	0.94	1.18
0.7	80	2448.85	29.28	2422.03	29.68	1.10	1.36
0.7	90	2410.90	29.27	2380.71	29.74	1.25	1.63
0.7	100	2372.91	29.29	2339.34	29.80	1.41	1.72
0.8	0	2746.61	29.00	2746.61	29.00	0.00	0.00
0.8	10	2710.65	29.32	2705.62	29.11	0.19	0.71
0.8	20	2674.65	29.32	2664.60	29.21	0.38	0.36
0.8	30	2638.62	29.29	2623.53	29.30	0.57	0.06
0.8	40	2602.55	29.34	2582.42	29.39	0.77	0.18
0.8	50	2566.44	29.34	2541.26	29.47	0.98	0.46
0.8	60	2530.29	29.32	2500.06	29.55	1.19	0.78
0.8	70	2494.11	29.29	2458.82	29.62	1.41	1.12
0.8	80	2457.89	29.30	2417.54	29.68	1.64	1.30
0.8	90	2421.63	29.28	2376.21	29.74	1.88	1.57
0.8	100	2385.34	29.31	2334.84	29.80	2.12	1.66
0.9	0	2745.23	29.00	2745.23	29.00	0.00	0.00
0.9	10	2710.96	29.30	2704.25	29.11	0.25	0.64
0.9	20	2676.64	29.30	2663.22	29.21	0.50	0.29
0.9	30	2642.30	29.27	2622.15	29.30	0.76	0.12

LAMPIRAN C Validasi Pemodelan Temperatur dan Tekanan pada *Production well*

Validasi model pada *production well* dilakukan dengan membandingkan hasil model dengan hasil simulasi pada perangkat lunak PIPESIM. Pada Tabel C1, tekanan injeksi CO₂ divariasikan, laju aliran massa dan temperatur injeksi yang tetap. Nilai variasi berada diantara nilai 1071 hingga 1200 psi.

Tabel C1 Validasi model injeksi CO₂ terhadap variasi laju aliran massa injeksi

P	Elevasi	PIPESIM		PIPESIM		Error(%)	
		P	T	P	T	P	T
1071	0	1773.30	31.00	1773.25	30.71	0.00	0.95
1071	50	1749.55	30.98	1721.87	30.57	1.58	1.32
1071	100	1700.00	30.93	1670.49	30.44	1.74	1.59
1071	150	1650.46	30.87	1619.11	30.30	1.90	1.83
1071	200	1600.91	30.80	1567.72	30.17	2.07	2.05
1071	250	1551.37	30.73	1516.33	30.04	2.26	2.24
1071	300	1493.85	30.64	1464.93	29.91	1.94	2.36
1071	350	1443.07	30.54	1413.53	29.78	2.05	2.49
1071	400	1392.30	30.45	1362.13	29.66	2.17	2.60
1071	450	1341.52	30.34	1310.72	29.53	2.30	2.67
1071	500	1290.71	30.23	1259.31	29.41	2.43	2.72
1071	550	1239.92	30.11	1207.90	29.28	2.58	2.74
1071	600	1175.44	29.94	1156.48	29.16	1.61	2.62
1071	650	1124.11	29.80	1105.06	29.04	1.69	2.57
1071	700	1072.81	29.66	1053.63	28.92	1.79	2.50
1071	750	1021.47	29.51	1002.20	28.80	1.89	2.40
1071	800	970.16	29.35	950.77	28.68	2.00	2.28

Tabel C1 (lanjutan)

P	Elevasi	PIPESIM		PIPESIM		Error(%)	
		P	T	P	T	P	T
1071	850	913.90	29.17	899.34	28.56	1.59	2.07
1071	900	862.56	28.99	847.90	28.45	1.70	1.88
1071	950	811.22	28.81	796.46	28.33	1.82	1.66
1071	1000	759.87	28.63	745.01	28.22	1.95	1.42
1071	1050	708.51	28.43	693.57	28.11	2.11	1.14
1071	1100	657.15	28.23	642.11	28.00	2.29	0.83
1100	0	1819.80	31.00	1819.76	30.71	0.00	0.94
1100	50	1796.05	30.98	1768.38	30.57	1.54	1.31
1100	100	1746.50	30.93	1717.00	30.44	1.69	1.59
1100	150	1696.96	30.87	1665.61	30.30	1.85	1.83
1100	200	1647.41	30.80	1614.22	30.17	2.01	2.05
1100	250	1597.86	30.73	1562.83	30.04	2.19	2.25
1100	300	1540.34	30.64	1511.43	29.91	1.88	2.37
1100	350	1489.57	30.54	1460.03	29.78	1.98	2.50
1100	400	1438.79	30.45	1408.62	29.65	2.10	2.60
1100	450	1388.02	30.34	1357.21	29.53	2.22	2.68
1100	500	1337.20	30.23	1305.80	29.40	2.35	2.73
1100	550	1286.42	30.11	1254.38	29.28	2.49	2.75
1100	600	1221.93	29.94	1202.97	29.16	1.55	2.63
1100	650	1170.60	29.80	1151.54	29.03	1.63	2.59
1100	700	1119.30	29.66	1100.11	28.91	1.71	2.52
1100	750	1067.96	29.51	1048.68	28.79	1.80	2.42
1100	800	1011.72	29.33	997.25	28.68	1.43	2.24

Tabel C1 (lanjutan)

P	Elevasi	PIPESIM		PIPESIM		Error(%)	
		P	T	P	T	P	T
1100	850	960.39	29.17	945.81	28.56	1.52	2.09
1100	900	909.05	28.99	894.37	28.44	1.61	1.90
1100	950	857.71	28.81	842.93	28.33	1.72	1.68
1100	1000	806.35	28.63	791.48	28.21	1.84	1.44
1100	1050	754.99	28.43	740.03	28.10	1.98	1.16
1100	1100	703.63	28.23	688.58	27.99	2.14	0.86
1200	0	1979.70	31.00	1979.66	30.71	0.00	0.93
1200	50	1955.94	30.98	1928.27	30.57	1.41	1.31
1200	100	1906.40	30.93	1876.89	30.44	1.55	1.59
1200	150	1856.85	30.87	1825.49	30.30	1.69	1.84
1200	200	1807.30	30.80	1774.10	30.17	1.84	2.06
1200	250	1757.75	30.73	1722.70	30.04	1.99	2.26
1200	300	1700.23	30.64	1671.30	29.91	1.70	2.38
1200	350	1649.45	30.54	1619.89	29.78	1.79	2.52
1200	400	1598.67	30.45	1568.48	29.65	1.89	2.62
1200	450	1547.89	30.34	1517.06	29.52	1.99	2.70
1200	500	1497.08	30.23	1465.65	29.39	2.10	2.76
1200	550	1446.29	30.11	1414.22	29.27	2.22	2.78
1200	600	1381.79	29.94	1362.80	29.14	1.37	2.67
1200	650	1330.46	29.80	1311.37	29.02	1.44	2.63
1200	700	1279.16	29.66	1259.94	28.90	1.50	2.56
1200	750	1227.82	29.51	1208.50	28.78	1.57	2.47
1200	800	1171.57	29.33	1157.06	28.66	1.24	2.30
1200	850	1120.24	29.17	1105.62	28.54	1.31	2.14
1200	900	1068.90	28.99	1054.17	28.42	1.38	1.96
1200	950	1017.55	28.81	1002.72	28.31	1.46	1.75

Tabel C1 (lanjutan)

P	Elevasi	PIPESIM		PIPESIM		Error(%)	
		P	T	P	T	P	T
1100	850	960.39	29.17	945.81	28.56	1.52	2.09
1200	1000	966.20	28.63	951.27	28.19	1.55	1.51
1200	1050	914.84	28.43	899.81	28.08	1.64	1.24
1200	1100	863.47	28.23	848.35	27.97	1.75	0.94
AVERAGE ERROR						1.76	2.06

Pada Tabel C2 temperatur injeksi CO₂ divariasikan dengan tekanan dan laju aliran massa injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 31 hingga 40 °C.

Tabel C2 Validasi model injeksi CO₂ terhadap variasi laju aliran massa injeksi

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
31	0	1773.30	31.00	1773.25	30.71	0.00	0.95
31	50	1749.55	30.98	1721.87	30.57	1.58	1.32
31	100	1700.00	30.93	1670.49	30.44	1.74	1.59
31	150	1650.46	30.87	1619.11	30.30	1.90	1.83
31	200	1600.91	30.80	1567.72	30.17	2.07	2.05
31	250	1551.37	30.73	1516.33	30.04	2.26	2.24
31	300	1493.85	30.64	1464.93	29.91	1.94	2.36
31	350	1443.07	30.54	1413.53	29.78	2.05	2.49
31	400	1392.30	30.45	1362.13	29.66	2.17	2.60
31	450	1341.52	30.34	1310.72	29.53	2.30	2.67
31	500	1290.71	30.23	1259.31	29.41	2.43	2.72
31	550	1239.92	30.11	1207.90	29.28	2.58	2.74

Tabel C2 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
31	600	1175.44	29.94	1156.48	29.16	1.61	2.62
31	650	1124.11	29.80	1105.06	29.04	1.69	2.57
31	700	1072.81	29.66	1053.63	28.92	1.79	2.50
31	750	1021.47	29.51	1002.20	28.80	1.89	2.40
31	800	970.16	29.35	950.77	28.68	2.00	2.28
31	850	913.90	29.17	899.34	28.56	1.59	2.07
31	900	862.56	28.99	847.90	28.45	1.70	1.88
31	950	811.22	28.81	796.46	28.33	1.82	1.66
31	1000	759.87	28.63	745.01	28.22	1.95	1.42
31	1050	708.51	28.43	693.57	28.11	2.11	1.14
31	1100	657.15	28.23	642.11	28.00	2.29	0.83
32	0	1772.00	31.01	1771.96	31.01	0.00	0.00
32	50	1748.25	30.99	1720.60	30.88	1.58	0.37
32	100	1698.70	30.94	1669.23	30.74	1.73	0.65
32	150	1649.16	30.88	1617.86	30.61	1.90	0.90
32	200	1599.62	30.82	1566.49	30.47	2.07	1.12
32	250	1550.07	30.74	1515.11	30.34	2.26	1.32
32	300	1492.55	30.65	1463.73	30.21	1.93	1.44
32	350	1441.78	30.56	1412.34	30.08	2.04	1.57
32	400	1391.01	30.46	1360.95	29.95	2.16	1.68
32	450	1340.23	30.35	1309.55	29.82	2.29	1.75
32	500	1289.42	30.24	1258.16	29.69	2.42	1.80
32	550	1238.63	30.12	1206.75	29.57	2.57	1.83
32	600	1174.14	29.96	1155.35	29.45	1.60	1.70
32	650	1122.82	29.82	1103.94	29.32	1.68	1.66
32	700	1071.52	29.67	1052.53	29.20	1.77	1.59

Tabel C2 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
32	800	963.94	29.35	949.69	28.96	1.48	1.32
32	850	912.61	29.18	898.27	28.84	1.57	1.16
32	900	861.28	29.01	846.84	28.72	1.68	0.97
32	950	809.93	28.83	795.41	28.61	1.79	0.75
32	1000	758.58	28.64	743.98	28.49	1.92	0.51
32	1050	707.22	28.44	692.54	28.38	2.08	0.23
32	1100	655.86	28.24	641.10	28.27	2.25	0.08
33	0	1770.70	31.29	1770.68	31.29	0.00	0.00
33	50	1746.95	31.27	1719.32	31.15	1.58	0.38
33	100	1697.42	31.22	1667.97	31.01	1.73	0.66
33	150	1647.89	31.16	1616.61	30.87	1.90	0.91
33	200	1598.36	31.09	1565.25	30.74	2.07	1.13
33	250	1548.82	31.02	1513.88	30.60	2.26	1.33
33	300	1491.31	30.92	1462.51	30.47	1.93	1.45
33	350	1440.55	30.83	1411.13	30.34	2.04	1.59
33	400	1389.79	30.73	1359.75	30.21	2.16	1.69
33	450	1339.02	30.62	1308.37	30.08	2.29	1.77
33	500	1288.22	30.51	1256.98	29.95	2.43	1.82
33	550	1237.45	30.39	1205.59	29.82	2.57	1.85
33	600	1172.97	30.22	1154.20	29.70	1.60	1.72
33	650	1121.66	30.08	1102.80	29.57	1.68	1.68
33	700	1070.37	29.93	1051.40	29.45	1.77	1.61
33	750	1019.04	29.78	999.99	29.33	1.87	1.52
33	800	962.82	29.60	948.58	29.21	1.48	1.34
33	850	911.50	29.44	897.17	29.09	1.57	1.18
33	900	860.17	29.26	845.76	28.97	1.68	0.99

Tabel C2 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
33	950	808.84	29.08	794.34	28.85	1.79	0.78
33	1000	757.50	28.89	742.91	28.74	1.93	0.53
33	1050	706.15	28.69	691.49	28.62	2.08	0.25
33	1100	654.80	28.49	640.06	28.51	2.25	0.06
34	0	1769.40	31.52	1769.39	31.52	0.00	0.00
34	50	1745.66	31.50	1718.05	31.38	1.58	0.38
34	100	1696.13	31.45	1666.70	31.24	1.74	0.66
34	150	1646.61	31.39	1615.35	31.11	1.90	0.92
34	200	1597.09	31.33	1564.00	30.97	2.07	1.14
34	250	1547.56	31.25	1512.64	30.83	2.26	1.34
34	300	1490.07	31.16	1461.28	30.70	1.93	1.47
34	350	1439.32	31.07	1409.91	30.57	2.04	1.60
34	400	1388.56	30.97	1358.55	30.43	2.16	1.71
34	450	1337.81	30.86	1307.17	30.30	2.29	1.79
34	500	1287.02	30.74	1255.79	30.17	2.43	1.84
34	550	1236.25	30.62	1204.41	30.05	2.58	1.87
34	600	1171.79	30.45	1153.03	29.92	1.60	1.75
34	650	1120.48	30.31	1101.64	29.79	1.68	1.71
34	700	1069.20	30.16	1050.25	29.67	1.77	1.64
34	750	1017.89	30.01	998.85	29.55	1.87	1.54
34	800	961.67	29.83	947.45	29.42	1.48	1.36
34	850	910.36	29.66	896.05	29.30	1.57	1.20
34	900	859.05	29.48	844.64	29.18	1.68	1.02
34	950	807.72	29.30	793.23	29.06	1.79	0.80
34	1000	756.39	29.11	741.82	28.95	1.93	0.55
34	1050	705.05	28.91	690.40	28.83	2.08	0.27

Tabel C2 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
34	1100	653.71	28.70	638.98	28.71	2.25	0.04
35	0	1768.10	31.73	1768.10	31.72	0.00	0.00
35	50	1744.36	31.70	1716.77	31.58	1.58	0.38
35	100	1694.85	31.65	1665.43	31.44	1.74	0.67
35	150	1645.33	31.59	1614.09	31.30	1.90	0.92
35	200	1595.82	31.53	1562.75	31.17	2.07	1.15
35	250	1546.30	31.45	1511.40	31.03	2.26	1.35
35	300	1488.81	31.36	1460.04	30.89	1.93	1.48
35	350	1438.07	31.27	1408.69	30.76	2.04	1.62
35	400	1387.32	31.16	1357.32	30.63	2.16	1.73
35	450	1336.58	31.06	1305.96	30.49	2.29	1.81
35	500	1285.79	30.94	1254.59	30.36	2.43	1.86
35	550	1235.04	30.82	1203.22	30.23	2.58	1.89
35	600	1170.59	30.65	1151.84	30.11	1.60	1.77
35	650	1119.29	30.51	1100.46	29.98	1.68	1.73
35	700	1068.02	30.36	1049.08	29.85	1.77	1.66
35	750	1016.71	30.20	997.69	29.73	1.87	1.56
35	800	960.50	30.02	946.30	29.61	1.48	1.38
35	850	909.20	29.85	894.90	29.48	1.57	1.22
35	900	857.89	29.67	843.50	29.36	1.68	1.04
35	950	806.58	29.48	792.10	29.24	1.79	0.82
35	1000	755.25	29.29	740.70	29.12	1.93	0.57
35	1050	703.92	29.09	689.29	29.01	2.08	0.29
35	1100	652.59	28.88	637.88	28.89	2.25	0.02
36	0	1766.80	31.89	1766.81	31.89	0.00	0.00
36	50	1743.06	31.87	1715.48	31.75	1.58	0.38

Tabel C2 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
36	100	1693.56	31.82	1664.16	31.60	1.74	0.67
36	150	1644.05	31.76	1612.82	31.46	1.90	0.93
36	200	1594.54	31.69	1561.48	31.32	2.07	1.15
36	250	1545.03	31.62	1510.14	31.19	2.26	1.36
36	300	1487.55	31.52	1458.80	31.05	1.93	1.49
36	350	1436.81	31.43	1407.45	30.92	2.04	1.63
36	400	1386.08	31.33	1356.09	30.78	2.16	1.74
36	450	1335.33	31.22	1304.73	30.65	2.29	1.82
36	500	1284.56	31.10	1253.37	30.52	2.43	1.87
36	550	1233.81	30.98	1202.00	30.39	2.58	1.90
36	600	1169.37	30.81	1150.63	30.26	1.60	1.78
36	650	1118.07	30.66	1099.26	30.13	1.68	1.74
36	700	1066.81	30.51	1047.88	30.00	1.77	1.67
36	750	1015.51	30.36	996.50	29.88	1.87	1.58
36	800	959.31	30.18	945.12	29.75	1.48	1.40
36	850	908.01	30.00	893.73	29.63	1.57	1.24
36	900	856.71	29.82	842.34	29.51	1.68	1.05
36	950	805.40	29.64	790.94	29.39	1.80	0.83
36	1000	754.08	29.44	739.54	29.27	1.93	0.58
36	1050	702.76	29.24	688.14	29.15	2.08	0.30
36	1100	651.43	29.03	636.73	29.03	2.26	0.01
37	0	1765.50	32.01	1765.52	32.01	0.00	0.00
37	50	1741.77	31.99	1714.20	31.87	1.58	0.38
37	100	1692.26	31.94	1662.88	31.73	1.74	0.67
37	150	1642.76	31.88	1611.55	31.59	1.90	0.93
37	200	1593.26	31.82	1560.22	31.45	2.07	1.16

Tabel C2 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
37	250	1543.75	31.74	1508.88	31.31	2.26	1.36
37	300	1486.28	31.64	1457.54	31.17	1.93	1.49
37	350	1435.55	31.55	1406.19	31.04	2.04	1.63
37	400	1384.81	31.45	1354.84	30.90	2.16	1.74
37	450	1334.08	31.34	1303.49	30.77	2.29	1.83
37	500	1283.31	31.22	1252.13	30.64	2.43	1.88
37	550	1232.56	31.10	1200.77	30.51	2.58	1.91
37	600	1168.13	30.93	1149.41	30.38	1.60	1.79
37	650	1116.84	30.79	1098.04	30.25	1.68	1.75
37	700	1065.58	30.64	1046.67	30.12	1.78	1.68
37	750	1014.28	30.48	995.29	29.99	1.87	1.59
37	800	958.09	30.30	943.91	29.87	1.48	1.41
37	850	906.80	30.12	892.53	29.75	1.57	1.25
37	900	855.50	29.94	841.14	29.62	1.68	1.06
37	950	804.20	29.75	789.75	29.50	1.80	0.84
37	1000	752.88	29.56	738.35	29.38	1.93	0.60
37	1050	701.57	29.36	686.96	29.26	2.08	0.31
37	1100	650.24	29.15	635.56	29.15	2.26	0.00
38	0	1764.20	32.10	1764.23	32.10	0.00	0.00
38	50	1740.47	32.08	1712.91	31.96	1.58	0.38
38	100	1690.97	32.03	1661.59	31.81	1.74	0.67
38	150	1641.47	31.97	1610.27	31.67	1.90	0.93
38	200	1591.97	31.90	1558.94	31.53	2.07	1.16
38	250	1542.47	31.83	1507.61	31.39	2.26	1.36
38	300	1485.00	31.73	1456.27	31.25	1.93	1.49
38	350	1434.27	31.64	1404.93	31.12	2.05	1.64

Tabel C2 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
38	400	1383.54	31.53	1353.58	30.98	2.17	1.75
38	450	1332.81	31.43	1302.23	30.85	2.29	1.83
38	500	1282.04	31.31	1250.88	30.72	2.43	1.89
38	550	1231.30	31.18	1199.52	30.59	2.58	1.92
38	600	1166.87	31.01	1148.16	30.46	1.60	1.80
38	650	1115.59	30.87	1096.79	30.33	1.68	1.76
38	700	1064.33	30.72	1045.43	30.20	1.78	1.69
38	750	1013.04	30.56	994.05	30.07	1.87	1.59
38	800	956.84	30.38	942.68	29.95	1.48	1.41
38	850	905.56	30.20	891.30	29.82	1.57	1.26
38	900	854.26	30.02	839.91	29.70	1.68	1.07
38	950	802.96	29.83	788.53	29.58	1.80	0.85
38	1000	751.65	29.64	737.14	29.46	1.93	0.60
38	1050	700.34	29.43	685.74	29.34	2.08	0.32
38	1100	649.02	29.22	634.34	29.22	2.26	0.01
39	0	1762.90	32.14	1762.94	32.14	0.00	0.00
39	50	1739.17	32.11	1711.62	31.99	1.58	0.38
39	100	1689.67	32.06	1660.31	31.85	1.74	0.67
39	150	1640.17	32.00	1608.98	31.71	1.90	0.93
39	200	1590.67	31.94	1557.66	31.57	2.08	1.16
39	250	1541.17	31.86	1506.32	31.43	2.26	1.36
39	300	1483.70	31.77	1454.99	31.29	1.94	1.50
39	350	1432.98	31.67	1403.65	31.15	2.05	1.64
39	400	1382.25	31.57	1352.30	31.02	2.17	1.75
39	450	1331.52	31.46	1300.96	30.88	2.30	1.83
39	500	1280.75	31.34	1249.60	30.75	2.43	1.89

Tabel C2 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
39	550	1230.02	31.22	1198.25	30.62	2.58	1.92
39	600	1165.59	31.05	1146.89	30.49	1.60	1.80
39	650	1114.30	30.91	1095.52	30.36	1.69	1.76
39	700	1063.05	30.75	1044.16	30.23	1.78	1.69
39	750	1011.76	30.60	992.79	30.11	1.88	1.60
39	800	955.57	30.41	941.41	29.98	1.48	1.42
39	850	904.28	30.24	890.03	29.86	1.58	1.26
39	900	852.99	30.06	838.65	29.73	1.68	1.07
39	950	801.69	29.87	787.26	29.61	1.80	0.85
39	1000	750.38	29.67	735.87	29.49	1.93	0.60
39	1050	699.07	29.47	684.48	29.37	2.09	0.32
39	1100	647.75	29.26	633.09	29.25	2.26	0.01
40	0	1761.60	32.07	1761.65	32.07	0.00	0.00
40	50	1737.87	32.05	1710.33	31.92	1.58	0.38
40	100	1688.37	32.00	1659.01	31.78	1.74	0.67
40	150	1638.87	31.94	1607.68	31.64	1.90	0.93
40	200	1589.36	31.87	1556.35	31.50	2.08	1.16
40	250	1539.86	31.80	1505.02	31.36	2.26	1.36
40	300	1482.39	31.70	1453.68	31.22	1.94	1.49
40	350	1431.66	31.61	1402.34	31.09	2.05	1.63
40	400	1380.93	31.50	1350.99	30.95	2.17	1.75
40	450	1330.20	31.40	1299.64	30.82	2.30	1.83
40	500	1279.43	31.28	1248.28	30.69	2.43	1.89
40	550	1228.69	31.15	1196.92	30.56	2.58	1.91
40	600	1164.25	30.98	1145.56	30.43	1.61	1.79
40	650	1112.97	30.84	1094.20	30.30	1.69	1.75

Tabel C2 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
40	700	1061.71	30.69	1042.83	30.17	1.78	1.69
40	750	1010.42	30.53	991.45	30.04	1.88	1.59
40	800	954.22	30.35	940.07	29.92	1.48	1.41
40	850	902.94	30.17	888.69	29.80	1.58	1.25
40	900	851.64	29.99	837.31	29.67	1.68	1.06
40	950	800.34	29.80	785.92	29.55	1.80	0.85
40	1000	749.03	29.61	734.53	29.43	1.94	0.60
40	1050	697.71	29.41	683.13	29.31	2.09	0.32
40	1100	646.39	29.20	631.73	29.19	2.27	0.00
AVERAGE ERROR						1.86	1.26

Pada Tabel C3 laju aliran massa injeksi CO₂ divariasikan dengan tekanan dan temperatur injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 0.2 hingga 0.5 kg/s.

Tabel C3 Validasi model injeksi CO₂ terhadap variasi laju aliran massa injeksi

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0.2	0	1944.40	30.68	1944.36	30.68	0.00	0.00
0.2	50	1920.64	30.66	1893.06	30.58	1.44	0.26
0.2	100	1871.09	30.61	1841.75	30.48	1.57	0.41
0.2	150	1821.53	30.54	1790.44	30.38	1.71	0.52
0.2	200	1771.98	30.46	1739.12	30.28	1.85	0.59
0.2	250	1722.42	30.37	1687.81	30.18	2.01	0.62
0.2	300	1664.88	30.26	1636.49	30.09	1.71	0.56

Tabel C3 (lanjutan)

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0.2	350	1614.09	30.14	1585.17	29.99	1.79	0.51
0.2	400	1563.30	30.02	1533.84	29.90	1.88	0.42
0.2	450	1512.51	29.89	1482.52	29.80	1.98	0.29
0.2	500	1461.68	29.74	1431.19	29.71	2.09	0.12
0.2	550	1410.88	29.58	1379.86	29.61	2.20	0.10
0.2	600	1346.36	29.37	1328.52	29.52	1.32	0.50
0.2	650	1295.01	29.19	1277.19	29.43	1.38	0.81
0.2	700	1243.68	29.00	1225.85	29.33	1.43	1.15
0.2	750	1192.32	28.80	1174.51	29.24	1.49	1.54
0.2	800	1136.05	28.57	1123.17	29.15	1.13	2.04
0.2	850	1084.69	28.35	1071.82	29.06	1.19	2.51
0.2	900	1033.32	28.12	1020.48	28.97	1.24	3.03
0.2	950	981.94	27.88	969.13	28.89	1.30	3.60
0.2	1000	930.55	27.63	917.78	28.80	1.37	4.22
0.2	1050	879.15	27.38	866.42	28.71	1.45	4.88
0.2	1100	827.74	27.11	815.07	28.62	1.53	5.60
0.3	0	1780.50	30.71	1780.51	30.71	0.00	0.00
0.3	50	1756.74	30.68	1729.13	30.57	1.57	0.37
0.3	100	1707.19	30.63	1677.76	30.44	1.72	0.64
0.3	150	1657.63	30.58	1626.38	30.31	1.89	0.88
0.3	200	1608.07	30.51	1574.99	30.18	2.06	1.09
0.3	250	1558.51	30.44	1523.60	30.05	2.24	1.28
0.3	300	1500.98	30.34	1472.21	29.92	1.92	1.40
0.3	350	1450.20	30.25	1420.81	29.79	2.03	1.52
0.3	400	1399.41	30.15	1369.42	29.66	2.14	1.62
0.3	450	1348.62	30.05	1318.01	29.54	2.27	1.68

Tabel C3 (lanjutan)

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0.3	500	1297.80	29.93	1266.61	29.42	2.40	1.73
0.3	550	1247.00	29.81	1215.19	29.29	2.55	1.74
0.3	600	1182.49	29.65	1163.78	29.17	1.58	1.61
0.3	650	1131.16	29.51	1112.36	29.05	1.66	1.56
0.3	700	1079.84	29.37	1060.94	28.93	1.75	1.48
0.3	750	1028.49	29.22	1009.52	28.81	1.84	1.37
0.3	800	972.24	29.04	958.09	28.70	1.46	1.18
0.3	850	920.90	28.87	906.66	28.58	1.55	1.01
0.3	900	869.55	28.70	855.23	28.47	1.65	0.82
0.3	950	818.19	28.52	803.79	28.35	1.76	0.59
0.3	1000	766.83	28.33	752.35	28.24	1.89	0.33
0.3	1050	715.46	28.14	700.90	28.13	2.03	0.04
0.3	1100	664.08	27.94	649.46	28.02	2.20	0.28
0.4	0	1614.60	30.72	1614.57	30.72	0.00	0.00
0.4	50	1590.84	30.70	1563.10	30.56	1.74	0.46
0.4	100	1541.28	30.65	1511.63	30.40	1.92	0.82
0.4	150	1491.73	30.60	1460.16	30.24	2.12	1.16
0.4	200	1442.17	30.54	1408.68	30.09	2.32	1.48
0.4	250	1392.61	30.47	1357.19	29.93	2.54	1.77
0.4	300	1335.08	30.39	1305.70	29.78	2.20	2.00
0.4	350	1284.29	30.31	1254.21	29.63	2.34	2.25
0.4	400	1233.51	30.23	1202.71	29.48	2.50	2.47
0.4	450	1182.72	30.13	1151.20	29.33	2.66	2.66
0.4	500	1131.90	30.04	1099.69	29.19	2.85	2.84
0.4	550	1081.11	29.94	1048.18	29.04	3.05	2.99
0.4	600	1016.61	29.80	996.66	28.90	1.96	3.03

Tabel C3 (lanjutan)

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0.4	650	965.27	29.68	945.14	28.75	2.09	3.13
0.4	700	913.97	29.56	893.62	28.61	2.23	3.21
0.4	750	862.62	29.44	842.09	28.48	2.38	3.26
0.4	800	806.38	29.29	790.55	28.34	1.96	3.25
0.4	850	755.05	29.15	739.01	28.20	2.12	3.26
0.4	900	703.71	29.01	687.47	28.07	2.31	3.25
0.4	950	652.37	28.86	635.92	27.94	2.52	3.21
0.4	1000	601.01	28.71	584.37	27.80	2.77	3.15
0.4	1050	549.66	28.55	532.82	27.67	3.06	3.06
0.4	1100	498.30	28.38	481.26	27.55	3.42	2.96
0.5	0	1446.20	30.74	1446.22	30.74	0.00	0.00
0.5	50	1422.44	30.72	1394.63	30.56	1.95	0.53
0.5	100	1372.88	30.67	1343.05	30.37	2.17	0.97
0.5	150	1323.33	30.62	1291.45	30.19	2.41	1.38
0.5	200	1273.77	30.56	1239.85	30.02	2.66	1.78
0.5	250	1224.21	30.50	1188.24	29.84	2.94	2.16
0.5	300	1166.67	30.42	1136.63	29.67	2.58	2.48
0.5	350	1115.89	30.35	1085.01	29.50	2.77	2.81
0.5	400	1065.11	30.27	1033.39	29.33	2.98	3.12
0.5	450	1014.32	30.19	981.76	29.16	3.21	3.41
0.5	500	963.50	30.11	930.12	29.00	3.46	3.68
0.5	550	912.71	30.01	878.49	28.83	3.75	3.93
0.5	600	848.21	29.89	826.84	28.67	2.52	4.08
0.5	650	796.88	29.79	775.19	28.52	2.72	4.28
0.5	700	745.58	29.68	723.54	28.36	2.96	4.47
0.5	750	694.24	29.57	671.88	28.20	3.22	4.64

Tabel C3 (lanjutan)

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0.5	800	638.00	29.45	620.21	28.05	2.79	4.75
0.5	850	586.67	29.33	568.55	27.90	3.09	4.87
0.5	900	535.34	29.20	516.87	27.75	3.45	4.98
0.5	950	484.01	29.07	465.20	27.60	3.89	5.07
0.5	1000	432.66	28.94	413.51	27.46	4.43	5.13
0.5	1050	381.32	28.80	361.83	27.31	5.11	5.18
0.5	1100	329.97	28.66	310.14	27.17	6.01	5.21
AVERAGE ERROR						2.19	2.10

Pada Tabel C4 tekanan injeksi surfaktan divariasikan, dengan temperatur dan laju aliran massa injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 1071 hingga 1200 psi.

Tabel C4 Validasi model injeksi surfaktan terhadap variasi tekanan injeksi

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error (%)	
		P	T	P	T	P	T
1071	0	2333.70	30.77	2333.68	30.77	0.00	0.00
1071	50	2298.51	30.73	2257.49	30.43	1.78	0.95
1071	100	2225.12	30.61	2181.30	30.10	1.97	1.67
1071	150	2151.73	30.48	2105.09	29.77	2.17	2.30
1071	200	2078.33	30.32	2028.88	29.45	2.38	2.85
1071	250	2004.94	30.14	1952.66	29.14	2.61	3.32
1071	300	1919.74	29.91	1876.43	28.83	2.26	3.61
1071	350	1844.53	29.69	1800.19	28.52	2.40	3.91
1071	400	1769.32	29.44	1723.95	28.22	2.56	4.14

Tabel C4 (lanjutan)

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error (%)	
		P	T	P	T	P	T
1071	450	1694.11	29.18	1647.70	27.93	2.74	4.29
1071	500	1618.84	28.90	1571.45	27.64	2.93	4.36
1071	550	1543.62	28.61	1495.18	27.36	3.14	4.36
1071	600	1448.09	28.21	1418.92	27.08	2.01	3.99
1071	650	1372.06	27.87	1342.64	26.81	2.14	3.82
1071	700	1296.07	27.52	1266.36	26.54	2.29	3.57
1071	750	1220.02	27.15	1190.08	26.28	2.45	3.24
1071	800	1136.71	26.74	1113.79	26.02	2.02	2.68
1071	850	1060.66	26.34	1037.49	25.76	2.18	2.18
1071	900	984.61	25.92	961.19	25.51	2.38	1.58
1071	950	908.54	25.50	884.89	25.27	2.60	0.90
1071	1000	832.45	25.06	808.58	25.03	2.87	0.12
1071	1050	756.36	24.61	732.26	24.79	3.19	0.75
1071	1100	680.25	24.14	655.94	24.56	3.57	1.73
1100	0	2363.10	30.77	2363.05	30.77	0.00	0.00
1100	50	2327.91	30.73	2286.86	30.43	1.76	0.95
1100	100	2254.51	30.61	2210.66	30.10	1.95	1.67
1100	150	2181.12	30.48	2134.45	29.77	2.14	2.30
1100	200	2107.73	30.32	2058.24	29.45	2.35	2.85
1100	250	2034.33	30.14	1982.02	29.14	2.57	3.33
1100	300	1949.12	29.91	1905.79	28.83	2.22	3.62
1100	350	1873.92	29.69	1829.55	28.52	2.37	3.92
1100	400	1798.70	29.44	1753.30	28.22	2.52	4.14
1100	450	1723.49	29.18	1677.05	27.93	2.69	4.29
1100	500	1648.22	28.90	1600.79	27.64	2.88	4.37
1100	550	1572.99	28.61	1524.53	27.36	3.08	4.37

Tabel C4 (lanjutan)

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error (%)	
		P	T	P	T	P	T
1100	600	1477.47	28.21	1448.26	27.08	1.98	4.00
1100	650	1401.43	27.87	1371.98	26.81	2.10	3.82
1100	700	1325.44	27.52	1295.70	26.54	2.24	3.57
1100	750	1249.39	27.16	1219.41	26.28	2.40	3.24
1100	800	1166.07	26.74	1143.12	26.02	1.97	2.69
1100	850	1090.02	26.34	1066.82	25.76	2.13	2.18
1100	900	1013.97	25.92	990.52	25.51	2.31	1.59
1100	950	937.90	25.50	914.21	25.27	2.53	0.91
1100	1000	861.81	25.06	837.90	25.03	2.77	0.13
1100	1050	785.71	24.61	761.58	24.79	3.07	0.75
1100	1100	709.60	24.14	685.26	24.56	3.43	1.72
1200	0	2464.30	30.77	2464.32	30.77	0.00	0.00
1200	50	2429.10	30.73	2388.13	30.43	1.69	0.95
1200	100	2355.70	30.61	2311.92	30.10	1.86	1.67
1200	150	2282.30	30.48	2235.70	29.77	2.04	2.31
1200	200	2208.90	30.32	2159.48	29.45	2.24	2.86
1200	250	2135.49	30.14	2083.25	29.14	2.45	3.33
1200	300	2050.28	29.91	2007.01	28.83	2.11	3.62
1200	350	1975.06	29.69	1930.76	28.52	2.24	3.92
1200	400	1899.84	29.44	1854.51	28.22	2.39	4.15
1200	450	1824.62	29.18	1778.25	27.93	2.54	4.30
1200	500	1749.34	28.90	1701.99	27.64	2.71	4.38
1200	550	1674.11	28.61	1625.71	27.36	2.89	4.38
1200	600	1578.57	28.21	1549.43	27.08	1.85	4.01
1200	650	1502.53	27.87	1473.15	26.80	1.96	3.84
1200	700	1426.53	27.52	1396.86	26.54	2.08	3.59

Tabel C4 (lanjutan)

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error (%)	
		P	T	P	T	P	T
1200	800	1267.14	26.74	1244.26	26.01	1.81	2.71
1200	850	1191.09	26.34	1167.96	25.76	1.94	2.20
1200	900	1115.02	25.93	1091.65	25.51	2.10	1.61
1200	950	1038.94	25.50	1015.33	25.26	2.27	0.92
1200	1000	962.85	25.06	939.01	25.02	2.48	0.15
1200	1050	886.74	24.61	862.69	24.79	2.71	0.73
1200	1100	810.62	24.14	786.36	24.55	2.99	1.70
AVERAGE ERROR						2.23	2.63

Pada Tabel C5 temperatur injeksi surfaktan divariasikan, dengan tekanan, laju aliran massa dan konsentrasi injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 31 hingga 40 °C.

Tabel C5 Validasi model injeksi surfaktan terhadap variasi temperatur injeksi

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
31	0	2333.70	30.77	2333.68	30.77	0.00	0.00
31	50	2298.51	30.73	2257.49	30.43	1.78	0.95
31	100	2225.12	30.61	2181.30	30.10	1.97	1.67
31	150	2151.73	30.48	2105.09	29.77	2.17	2.30
31	200	2078.33	30.32	2028.88	29.45	2.38	2.85
31	250	2004.94	30.14	1952.66	29.14	2.61	3.32
31	300	1919.74	29.91	1876.43	28.83	2.26	3.61
31	350	1844.53	29.69	1800.19	28.52	2.40	3.91
31	400	1769.32	29.44	1723.95	28.22	2.56	4.14

Tabel C5 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error (%)	
		P	T	P	T	P	T
31	450	1694.11	29.18	1647.70	27.93	2.74	4.29
31	500	1618.84	28.90	1571.45	27.64	2.93	4.36
31	550	1543.62	28.61	1495.18	27.36	3.14	4.36
31	600	1448.09	28.21	1418.92	27.08	2.01	3.99
31	650	1372.06	27.87	1342.64	26.81	2.14	3.82
31	700	1296.07	27.52	1266.36	26.54	2.29	3.57
31	750	1220.02	27.15	1190.08	26.28	2.45	3.24
31	800	1136.71	26.74	1113.79	26.02	2.02	2.68
31	850	1060.66	26.34	1037.49	25.76	2.18	2.18
31	900	984.61	25.92	961.19	25.51	2.38	1.58
31	950	908.54	25.50	884.89	25.27	2.60	0.90
31	1000	832.45	25.06	808.58	25.03	2.87	0.12
31	1050	756.36	24.61	732.26	24.79	3.19	0.75
31	1100	680.25	24.14	655.94	24.56	3.57	1.73
32	0	2332.90	31.26	2332.88	31.26	0.00	0.00
32	50	2297.72	31.21	2256.71	30.91	1.78	0.96
32	100	2224.35	31.10	2180.54	30.57	1.97	1.69
32	150	2150.98	30.96	2104.35	30.24	2.17	2.33
32	200	2077.60	30.80	2028.16	29.91	2.38	2.90
32	250	2004.23	30.62	1951.96	29.58	2.61	3.38
32	300	1919.05	30.38	1875.75	29.27	2.26	3.68
32	350	1843.87	30.16	1799.53	28.95	2.40	3.99
32	400	1768.68	29.91	1723.31	28.65	2.57	4.22
32	450	1693.49	29.64	1647.08	28.35	2.74	4.38
32	500	1618.24	29.36	1570.84	28.05	2.93	4.46
32	550	1543.03	29.06	1494.60	27.76	3.14	4.47

Tabel C5 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
32	600	1447.53	28.65	1418.34	27.48	2.02	4.10
32	650	1371.52	28.31	1342.09	27.20	2.15	3.93
32	700	1295.55	27.95	1265.82	26.92	2.29	3.68
32	750	1219.52	27.58	1189.56	26.65	2.46	3.36
32	800	1136.23	27.15	1113.28	26.38	2.02	2.81
32	850	1060.20	26.74	1037.00	26.12	2.19	2.30
32	900	984.16	26.32	960.72	25.87	2.38	1.71
32	950	908.11	25.88	884.43	25.62	2.61	1.03
32	1000	832.04	25.43	808.13	25.37	2.87	0.25
32	1050	755.97	24.97	731.83	25.13	3.19	0.63
32	1100	679.88	24.50	655.53	24.89	3.58	1.61
33	0	2332.10	31.74	2332.08	31.74	0.00	0.00
33	50	2296.93	31.70	2255.93	31.39	1.78	0.97
33	100	2223.58	31.58	2179.78	31.04	1.97	1.72
33	150	2150.23	31.44	2103.61	30.70	2.17	2.37
33	200	2076.88	31.28	2027.44	30.36	2.38	2.95
33	250	2003.52	31.10	1951.26	30.03	2.61	3.44
33	300	1918.37	30.86	1875.07	29.70	2.26	3.75
33	350	1843.20	30.63	1798.87	29.38	2.41	4.06
33	400	1768.04	30.38	1722.67	29.07	2.57	4.30
33	450	1692.86	30.11	1646.45	28.76	2.74	4.47
33	500	1617.64	29.82	1570.23	28.46	2.93	4.56
33	550	1542.45	29.51	1494.01	28.16	3.14	4.57
33	600	1446.98	29.09	1417.77	27.87	2.02	4.21
33	650	1370.99	28.74	1341.53	27.58	2.15	4.04
33	700	1295.03	28.38	1265.29	27.30	2.30	3.80

Tabel C5 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
33	750	1219.02	28.00	1189.03	27.02	2.46	3.47
33	800	1135.75	27.56	1112.78	26.75	2.02	2.93
33	850	1059.74	27.14	1036.51	26.49	2.19	2.43
33	900	983.72	26.71	960.24	26.22	2.39	1.84
33	950	907.69	26.27	883.97	25.97	2.61	1.15
33	1000	831.64	25.81	807.69	25.71	2.88	0.37
33	1050	755.57	25.34	731.40	25.46	3.20	0.51
33	1100	679.50	24.85	655.11	25.22	3.59	1.49
34	0	2331.30	32.23	2331.28	32.23	0.00	0.00
34	50	2296.14	32.18	2255.16	31.87	1.78	0.98
34	100	2222.81	32.06	2179.02	31.51	1.97	1.74
34	150	2149.48	31.92	2102.88	31.16	2.17	2.40
34	200	2076.15	31.76	2026.72	30.81	2.38	2.99
34	250	2002.82	31.58	1950.56	30.47	2.61	3.49
34	300	1917.68	31.33	1874.39	30.14	2.26	3.81
34	350	1842.54	31.10	1798.21	29.81	2.41	4.14
34	400	1767.39	30.84	1722.02	29.49	2.57	4.38
34	450	1692.24	30.57	1645.83	29.18	2.74	4.55
34	500	1617.03	30.27	1569.63	28.87	2.93	4.65
34	550	1541.87	29.96	1493.42	28.56	3.14	4.67
34	600	1446.42	29.54	1417.20	28.26	2.02	4.31
34	650	1370.45	29.18	1340.98	27.97	2.15	4.15
34	700	1294.51	28.81	1264.75	27.68	2.30	3.91
34	750	1218.52	28.42	1188.51	27.40	2.46	3.59
34	800	1135.27	27.97	1112.27	27.12	2.03	3.04
34	850	1059.28	27.55	1036.02	26.85	2.20	2.54

Tabel C5 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
34	900	983.28	27.11	959.77	26.58	2.39	1.95
34	950	907.26	26.65	883.51	26.31	2.62	1.27
34	1000	831.23	26.18	807.24	26.06	2.89	0.49
34	1050	755.18	25.70	730.97	25.80	3.21	0.39
34	1100	679.12	25.20	654.70	25.55	3.60	1.38
35	0	2330.50	32.71	2330.48	32.71	0.00	0.00
35	50	2295.35	32.67	2254.38	32.34	1.78	0.99
35	100	2222.04	32.55	2178.26	31.98	1.97	1.76
35	150	2148.73	32.41	2102.14	31.62	2.17	2.44
35	200	2075.42	32.24	2026.00	31.26	2.38	3.03
35	250	2002.11	32.05	1949.86	30.92	2.61	3.54
35	300	1917.00	31.81	1873.71	30.58	2.26	3.87
35	350	1841.88	31.57	1797.55	30.24	2.41	4.20
35	400	1766.75	31.31	1721.38	29.91	2.57	4.46
35	450	1691.62	31.03	1645.20	29.59	2.74	4.64
35	500	1616.43	30.73	1569.02	29.27	2.93	4.74
35	550	1541.29	30.41	1492.83	28.96	3.14	4.76
35	600	1445.86	29.98	1416.63	28.66	2.02	4.41
35	650	1369.91	29.62	1340.42	28.36	2.15	4.25
35	700	1293.99	29.24	1264.21	28.06	2.30	4.01
35	750	1218.02	28.84	1187.99	27.77	2.47	3.69
35	800	1134.79	28.38	1111.76	27.49	2.03	3.15
35	850	1058.82	27.95	1035.53	27.21	2.20	2.65
35	900	982.83	27.50	959.29	26.93	2.39	2.07
35	950	906.83	27.04	883.05	26.66	2.62	1.39
35	1000	830.82	26.56	806.80	26.40	2.89	0.60

Tabel C5 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
35	1050	754.79	26.07	730.54	26.14	3.21	0.28
35	1100	678.74	25.56	654.28	25.88	3.60	1.27
36	0	2329.70	33.20	2329.68	33.20	0.00	0.00
36	50	2294.56	33.15	2253.60	32.82	1.79	1.00
36	100	2221.27	33.03	2177.50	32.44	1.97	1.78
36	150	2147.98	32.89	2101.40	32.08	2.17	2.47
36	200	2074.69	32.72	2025.29	31.72	2.38	3.07
36	250	2001.40	32.53	1949.16	31.36	2.61	3.59
36	300	1916.31	32.28	1873.03	31.01	2.26	3.92
36	350	1841.21	32.04	1796.89	30.67	2.41	4.26
36	400	1766.10	31.78	1720.74	30.34	2.57	4.53
36	450	1690.99	31.49	1644.58	30.01	2.74	4.71
36	500	1615.83	31.19	1568.41	29.68	2.93	4.82
36	550	1540.70	30.86	1492.24	29.36	3.15	4.85
36	600	1445.30	30.42	1416.06	29.05	2.02	4.50
36	650	1369.37	30.05	1339.87	28.74	2.15	4.35
36	700	1293.47	29.66	1263.67	28.44	2.30	4.11
36	750	1217.52	29.26	1187.47	28.15	2.47	3.80
36	800	1134.30	28.79	1111.26	27.86	2.03	3.26
36	850	1058.35	28.35	1035.04	27.57	2.20	2.76
36	900	982.39	27.90	958.82	27.29	2.40	2.17
36	950	906.41	27.42	882.59	27.01	2.63	1.49
36	1000	830.40	26.93	806.36	26.74	2.90	0.71
36	1050	754.39	26.43	730.12	26.48	3.22	0.17
36	1100	678.37	25.91	653.87	26.21	3.61	1.16
37	0	2328.90	33.68	2328.88	33.68	0.00	0.00

Tabel C5 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
37	50	2293.77	33.63	2252.82	33.29	1.79	1.01
37	100	2220.50	33.52	2176.74	32.91	1.97	1.80
37	150	2147.23	33.37	2100.66	32.54	2.17	2.49
37	200	2073.96	33.20	2024.57	32.17	2.38	3.11
37	250	2000.69	33.01	1948.46	31.81	2.61	3.63
37	300	1915.63	32.75	1872.35	31.45	2.26	3.98
37	350	1840.55	32.51	1796.23	31.10	2.41	4.33
37	400	1765.46	32.24	1720.10	30.76	2.57	4.60
37	450	1690.37	31.95	1643.96	30.42	2.75	4.79
37	500	1615.22	31.64	1567.81	30.09	2.94	4.90
37	550	1540.12	31.31	1491.65	29.77	3.15	4.93
37	600	1444.74	30.86	1415.49	29.45	2.03	4.59
37	650	1368.83	30.49	1339.31	29.13	2.16	4.44
37	700	1292.95	30.09	1263.13	28.82	2.31	4.21
37	750	1217.02	29.68	1186.95	28.52	2.47	3.90
37	800	1133.82	29.20	1110.75	28.22	2.03	3.36
37	850	1057.89	28.76	1034.55	27.93	2.21	2.86
37	900	981.94	28.29	958.34	27.64	2.40	2.28
37	950	905.98	27.81	882.13	27.36	2.63	1.60
37	1000	829.99	27.31	805.91	27.09	2.90	0.82
37	1050	754.00	26.80	729.69	26.81	3.22	0.07
37	1100	677.99	26.27	653.45	26.55	3.62	1.06
38	0	2328.10	34.17	2328.08	34.17	0.00	0.00
38	50	2292.98	34.12	2252.04	33.77	1.79	1.02
38	100	2219.73	34.00	2175.99	33.38	1.97	1.82
38	150	2146.48	33.85	2099.92	33.00	2.17	2.52

Tabel C5 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
38	200	2073.23	33.68	2023.85	32.62	2.38	3.14
38	250	1999.98	33.48	1947.76	32.25	2.61	3.68
38	300	1914.94	33.23	1871.67	31.89	2.26	4.03
38	350	1839.88	32.98	1795.57	31.53	2.41	4.38
38	400	1764.82	32.71	1719.45	31.18	2.57	4.66
38	450	1689.75	32.41	1643.33	30.84	2.75	4.86
38	500	1614.62	32.10	1567.20	30.50	2.94	4.98
38	550	1539.53	31.76	1491.06	30.17	3.15	5.01
38	600	1444.18	31.31	1414.91	29.84	2.03	4.68
38	650	1368.29	30.92	1338.76	29.52	2.16	4.53
38	700	1292.43	30.52	1262.60	29.21	2.31	4.30
38	750	1216.51	30.10	1186.42	28.90	2.47	3.99
38	800	1133.34	29.62	1110.25	28.59	2.04	3.46
38	850	1057.43	29.16	1034.06	28.29	2.21	2.96
38	900	981.50	28.68	957.87	28.00	2.41	2.38
38	950	905.55	28.19	881.67	27.71	2.64	1.70
38	1000	829.58	27.68	805.47	27.43	2.91	0.92
38	1050	753.60	27.16	729.26	27.15	3.23	0.03
38	1100	677.61	26.62	653.04	26.88	3.63	0.97
39	0	2327.30	34.65	2327.28	34.65	0.00	0.00
39	50	2292.19	34.60	2251.26	34.25	1.79	1.03
39	100	2218.96	34.48	2175.23	33.85	1.97	1.83
39	150	2145.73	34.33	2099.18	33.46	2.17	2.55
39	200	2072.50	34.16	2023.13	33.08	2.38	3.18
39	250	1999.27	33.96	1947.06	32.70	2.61	3.72
39	300	1914.26	33.70	1870.99	32.33	2.26	4.08

Tabel C5 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
39	350	1839.22	33.45	1794.90	31.96	2.41	4.44
39	400	1764.17	33.17	1718.81	31.61	2.57	4.72
39	450	1689.12	32.87	1642.71	31.25	2.75	4.92
39	500	1614.02	32.55	1566.59	30.91	2.94	5.05
39	550	1538.95	32.21	1490.47	30.57	3.15	5.09
39	600	1443.62	31.75	1414.34	30.24	2.03	4.76
39	650	1367.75	31.36	1338.20	29.91	2.16	4.62
39	700	1291.91	30.95	1262.06	29.59	2.31	4.39
39	750	1216.01	30.52	1185.90	29.27	2.48	4.08
39	800	1132.86	30.03	1109.74	28.96	2.04	3.55
39	850	1056.96	29.56	1033.57	28.66	2.21	3.06
39	900	981.05	29.08	957.40	28.36	2.41	2.47
39	950	905.12	28.57	881.21	28.06	2.64	1.79
39	1000	829.17	28.06	805.02	27.77	2.91	1.01
39	1050	753.21	27.52	728.83	27.49	3.24	0.12
39	1100	677.23	26.98	652.63	27.21	3.63	0.88
40	0	2326.50	35.14	2326.48	35.13	0.00	0.00
40	50	2291.40	35.09	2250.48	34.72	1.79	1.04
40	100	2218.19	34.96	2174.47	34.32	1.97	1.85
40	150	2144.98	34.82	2098.44	33.92	2.17	2.57
40	200	2071.78	34.64	2022.41	33.53	2.38	3.21
40	250	1998.56	34.44	1946.36	33.14	2.61	3.76
40	300	1913.57	34.17	1870.31	32.77	2.26	4.12
40	350	1838.55	33.92	1794.24	32.39	2.41	4.49
40	400	1763.53	33.64	1718.17	32.03	2.57	4.78
40	450	1688.50	33.33	1642.08	31.67	2.75	4.99

Tabel C5 (lanjutan)

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
39	350	1839.22	33.45	1794.90	31.96	2.41	4.44
40	500	1613.41	33.01	1565.99	31.32	2.94	5.12
40	550	1538.37	32.66	1489.88	30.97	3.15	5.16
40	600	1443.06	32.19	1413.77	30.63	2.03	4.83
40	650	1367.21	31.79	1337.65	30.30	2.16	4.69
40	700	1291.39	31.37	1261.52	29.97	2.31	4.48
40	750	1215.51	30.94	1185.38	29.65	2.48	4.17
40	800	1132.38	30.44	1109.24	29.33	2.04	3.64
40	850	1056.50	29.96	1033.08	29.02	2.22	3.14
40	900	980.60	29.47	956.92	28.71	2.42	2.56
40	950	904.69	28.96	880.75	28.41	2.65	1.88
40	1000	828.76	28.43	804.58	28.12	2.92	1.10
40	1050	752.82	27.89	728.40	27.83	3.24	0.21
40	1100	676.85	27.33	652.21	27.54	3.64	0.79
AVERAGE ERROR						2.39	2.90

Pada Tabel C6 laju aliran massa injeksi surfaktan divariasikan, dengan tekanan, laju aliran massa dan konsentrasi injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 0.2 hingga 0.5 kg/s.

Tabel C6 Validasi model injeksi surfaktan terhadap variasi laju aliran massa injeksi

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0.2	0	2330.80	30.77	2330.83	30.77	0.00	0.00
0.2	50	2295.62	30.73	2254.77	30.40	1.78	1.05
0.2	100	2222.24	30.60	2178.70	30.04	1.96	1.83
0.2	150	2148.86	30.44	2102.62	29.68	2.15	2.48
0.2	200	2075.47	30.25	2026.53	29.34	2.36	3.02
0.2	250	2002.09	30.03	1950.44	28.99	2.58	3.45
0.2	300	1916.89	29.74	1874.33	28.66	2.22	3.64
0.2	350	1841.69	29.46	1798.21	28.33	2.36	3.84
0.2	400	1766.49	29.15	1722.09	28.01	2.51	3.93
0.2	450	1691.27	28.82	1645.96	27.69	2.68	3.92
0.2	500	1616.00	28.46	1569.82	27.38	2.86	3.80
0.2	550	1540.77	28.08	1493.68	27.08	3.06	3.58
0.2	600	1445.23	27.57	1417.52	26.78	1.92	2.87
0.2	650	1369.18	27.14	1341.36	26.49	2.03	2.40
0.2	700	1293.17	26.69	1265.20	26.20	2.16	1.83
0.2	750	1217.09	26.22	1189.02	25.92	2.31	1.14
0.2	800	1133.74	25.69	1112.85	25.65	1.84	0.15
0.2	850	1057.67	25.18	1036.66	25.38	1.99	0.78
0.2	900	981.57	24.66	960.47	25.12	2.15	1.85

Tabel C6 (lanjutan)

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0.2	950	905.46	24.12	884.28	24.86	2.34	3.05
0.2	1000	829.32	23.57	808.08	24.60	2.56	4.40
0.2	1050	753.17	23.00	731.87	24.35	2.83	5.90
0.2	1100	677.01	22.41	655.66	24.11	3.15	7.56
0.3	0	2333.50	30.77	2333.52	30.77	0.00	0.00
0.3	50	2298.31	30.73	2257.33	30.43	1.78	0.95
0.3	100	2224.92	30.61	2181.15	30.10	1.97	1.67
0.3	150	2151.53	30.47	2104.95	29.77	2.16	2.31
0.3	200	2078.14	30.32	2028.74	29.45	2.38	2.86
0.3	250	2004.74	30.14	1952.53	29.13	2.60	3.33
0.3	300	1919.54	29.90	1876.31	28.82	2.25	3.62
0.3	350	1844.33	29.68	1800.08	28.52	2.40	3.92
0.3	400	1769.13	29.43	1723.84	28.22	2.56	4.14
0.3	450	1693.91	29.17	1647.60	27.92	2.73	4.28
0.3	500	1618.65	28.89	1571.35	27.63	2.92	4.35
0.3	550	1543.42	28.59	1495.10	27.35	3.13	4.35
0.3	600	1447.90	28.19	1418.84	27.07	2.01	3.97
0.3	650	1371.87	27.85	1342.57	26.80	2.14	3.79
0.3	700	1295.87	27.50	1266.30	26.53	2.28	3.53
0.3	750	1219.82	27.13	1190.02	26.26	2.44	3.18
0.3	800	1136.51	26.70	1113.74	26.00	2.00	2.62
0.3	850	1060.46	26.30	1037.45	25.75	2.17	2.10
0.3	900	984.41	25.89	961.15	25.50	2.36	1.50
0.3	950	908.34	25.46	884.85	25.25	2.59	0.80
0.3	1000	832.25	25.01	808.55	25.01	2.85	0.00
0.3	1050	756.16	24.56	732.24	24.78	3.16	0.89

Tabel C6 (lanjutan)

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0.3	1100	680.05	24.09	655.93	24.54	3.55	1.89
0.4	0	2338.00	30.77	2337.97	30.77	0.00	0.00
0.4	50	2302.80	30.73	2261.58	30.46	1.79	0.88
0.4	100	2229.40	30.62	2185.20	30.15	1.98	1.54
0.4	150	2156.00	30.49	2108.80	29.84	2.19	2.14
0.4	200	2082.59	30.35	2032.40	29.54	2.41	2.67
0.4	250	2009.19	30.19	1955.99	29.24	2.65	3.14
0.4	300	1923.98	29.99	1879.57	28.95	2.31	3.45
0.4	350	1848.76	29.79	1803.15	28.67	2.47	3.78
0.4	400	1773.55	29.58	1726.72	28.38	2.64	4.05
0.4	450	1698.33	29.36	1650.29	28.11	2.83	4.26
0.4	500	1623.06	29.12	1573.84	27.84	3.03	4.41
0.4	550	1547.83	28.87	1497.40	27.57	3.26	4.50
0.4	600	1452.31	28.52	1420.95	27.30	2.16	4.28
0.4	650	1376.28	28.24	1344.49	27.05	2.31	4.23
0.4	700	1300.30	27.94	1268.03	26.79	2.48	4.11
0.4	750	1224.26	27.63	1191.56	26.54	2.67	3.94
0.4	800	1140.95	27.27	1115.09	26.29	2.27	3.58
0.4	850	1064.92	26.93	1038.61	26.05	2.47	3.27
0.4	900	988.88	26.58	962.13	25.81	2.71	2.89
0.4	950	912.83	26.22	885.65	25.58	2.98	2.44
0.4	1000	836.77	25.84	809.16	25.35	3.30	1.91
0.4	1050	760.70	25.46	732.67	25.12	3.69	1.32
0.4	1100	684.62	25.06	656.17	24.90	4.16	0.64
0.5	0	2343.80	30.77	2343.78	30.77	0.00	0.00
0.5	50	2308.60	30.73	2267.14	30.48	1.80	0.82

Tabel C6 (lanjutan)

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error		
		P	T	P	T	P	T	
0.3	1100	680.05	24.09	655.93	24.54	3.55	1.89	
0.5	100	2235.18	30.62	2190.49	30.19	2.00	1.43	
0.5	150	2161.77	30.50	2113.84	29.90	2.22	1.98	
0.5	200	2088.35	30.37	2037.17	29.61	2.45	2.49	
0.5	250	2014.94	30.22	1960.51	29.34	2.70	2.94	
0.5	300	1929.71	30.04	1883.83	29.06	2.38	3.25	
0.5	350	1854.49	29.86	1807.15	28.79	2.55	3.59	
0.5	400	1779.27	29.68	1730.47	28.53	2.74	3.88	
0.5	450	1704.04	29.47	1653.78	28.26	2.95	4.11	
0.5	500	1628.76	29.26	1577.08	28.01	3.17	4.29	
0.5	550	1553.53	29.04	1500.38	27.75	3.42	4.43	
0.5	600	1458.00	28.74	1423.67	27.50	2.35	4.30	
0.5	650	1381.97	28.48	1346.96	27.26	2.53	4.31	
0.5	700	1305.98	28.22	1270.25	27.01	2.74	4.28	
0.5	750	1229.94	27.95	1193.53	26.78	2.96	4.19	
0.5	800	1146.65	27.63	1116.81	26.54	2.60	3.96	
0.5	850	1070.62	27.34	1040.08	26.31	2.85	3.76	
0.5	900	994.59	27.03	963.35	26.08	3.14	3.51	
0.5	950	918.54	26.71	886.62	25.86	3.48	3.19	
0.5	1000	842.49	26.38	809.88	25.64	3.87	2.83	
0.5	1050	766.43	26.05	733.14	25.42	4.34	2.40	
0.5	1100	690.37	25.70	656.39	25.21	4.92	1.91	
AVERAGE ERROR							2.49	2.89

Pada Tabel C7 konsentrasi injeksi surfaktan divariasikan, dengan tekanan, laju aliran massa dan temperatur injeksi tetap. Nilai variasi ditentukan antara 0.5 hingga 0.9 wt%.

Tabel C7 Validasi model injeksi surfaktan terhadap variasi konsentrasi injeksi

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0.5	0	2333.70	30.77	2333.68	30.77	0.00	0.00
0.5	50	2298.51	30.73	2257.49	30.43	1.78	0.95
0.5	100	2225.12	30.61	2181.30	30.10	1.97	1.67
0.5	150	2151.73	30.48	2105.09	29.77	2.17	2.30
0.5	200	2078.33	30.32	2028.88	29.45	2.38	2.85
0.5	250	2004.94	30.14	1952.66	29.14	2.61	3.32
0.5	300	1919.74	29.91	1876.43	28.83	2.26	3.61
0.5	350	1844.53	29.69	1800.19	28.52	2.40	3.91
0.5	400	1769.32	29.44	1723.95	28.22	2.56	4.14
0.5	450	1694.11	29.18	1647.70	27.93	2.74	4.29
0.5	500	1618.84	28.90	1571.45	27.64	2.93	4.36
0.5	550	1543.62	28.61	1495.18	27.36	3.14	4.36
0.5	600	1448.09	28.21	1418.92	27.08	2.01	3.99
0.5	650	1372.06	27.87	1342.64	26.81	2.14	3.82
0.5	700	1296.07	27.52	1266.36	26.54	2.29	3.57
0.5	750	1220.02	27.15	1190.08	26.28	2.45	3.24
0.5	800	1136.71	26.74	1113.79	26.02	2.02	2.68
0.5	850	1060.66	26.34	1037.49	25.76	2.18	2.18
0.5	900	984.61	25.92	961.19	25.51	2.38	1.58
0.5	950	908.54	25.50	884.89	25.27	2.60	0.90
0.5	1000	832.45	25.06	808.58	25.03	2.87	0.12
0.5	1050	756.36	24.61	732.26	24.79	3.19	0.75

Tabel C7 (lanjutan)

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0.5	1100	680.25	24.14	655.94	24.56	3.57	1.73
0.6	0	2337.40	30.77	2337.44	30.77	0.00	0.00
0.6	50	2301.66	30.72	2261.09	30.44	1.76	0.94
0.6	100	2227.13	30.60	2184.72	30.10	1.90	1.64
0.6	150	2152.61	30.46	2108.34	29.78	2.06	2.25
0.6	200	2078.08	30.30	2031.96	29.46	2.22	2.77
0.6	250	2003.55	30.11	1955.57	29.14	2.39	3.22
0.6	300	1917.02	29.87	1879.17	28.83	1.97	3.47
0.6	350	1840.66	29.63	1802.76	28.53	2.06	3.73
0.6	400	1764.28	29.38	1726.35	28.23	2.15	3.91
0.6	450	1687.91	29.10	1649.93	27.93	2.25	4.02
0.6	500	1611.48	28.81	1573.50	27.65	2.36	4.04
0.6	550	1535.09	28.50	1497.07	27.36	2.48	3.99
0.6	600	1438.08	28.08	1420.63	27.09	1.21	3.55
0.6	650	1360.88	27.73	1344.18	26.81	1.23	3.31
0.6	700	1283.71	27.36	1267.73	26.55	1.24	2.99
0.6	750	1206.48	26.98	1191.27	26.28	1.26	2.58
0.6	800	1121.88	26.54	1114.81	26.02	0.63	1.95
0.6	850	1044.66	26.13	1038.34	25.77	0.60	1.36
0.6	900	967.43	25.70	961.87	25.52	0.57	0.68
0.6	950	890.18	25.25	885.39	25.28	0.54	0.10
0.6	1000	812.92	24.79	808.91	25.04	0.49	0.98
0.6	1050	735.65	24.32	732.43	24.80	0.44	1.96
0.6	1100	658.36	23.84	655.94	24.57	0.37	3.06
0.7	0	2338.50	30.77	2338.53	30.77	0.00	0.00
0.7	50	2302.34	30.72	2262.12	30.44	1.75	0.94

Tabel C7 (lanjutan)

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0.7	100	2226.93	30.60	2185.70	30.10	1.85	1.62
0.7	150	2151.52	30.45	2109.27	29.78	1.96	2.21
0.7	200	2076.12	30.28	2032.84	29.46	2.08	2.71
0.7	250	2000.71	30.08	1956.39	29.14	2.21	3.13
0.7	300	1913.16	29.83	1879.94	28.83	1.74	3.34
0.7	350	1835.89	29.59	1803.48	28.53	1.77	3.57
0.7	400	1758.62	29.32	1727.01	28.23	1.80	3.72
0.7	450	1681.34	29.04	1650.53	27.94	1.83	3.79
0.7	500	1604.01	28.74	1574.05	27.65	1.87	3.77
0.7	550	1526.72	28.41	1497.56	27.37	1.91	3.67
0.7	600	1428.57	27.98	1421.07	27.09	0.53	3.17
0.7	650	1350.45	27.61	1344.57	26.82	0.44	2.88
0.7	700	1272.37	27.23	1268.06	26.55	0.34	2.51
0.7	750	1194.24	26.84	1191.54	26.29	0.23	2.04
0.7	800	1108.63	26.38	1115.03	26.03	0.58	1.34
0.7	850	1030.50	25.95	1038.50	25.78	0.78	0.68
0.7	900	952.36	25.51	961.97	25.53	1.01	0.08
0.7	950	874.20	25.05	885.44	25.28	1.28	0.94
0.7	1000	796.03	24.58	808.90	25.04	1.62	1.90
0.7	1050	717.85	24.09	732.35	24.81	2.02	2.98
0.7	1100	639.65	23.59	655.80	24.58	2.53	4.17
0.8	0	2334.10	30.77	2334.08	30.77	0.00	0.00
0.8	50	2297.61	30.72	2257.88	30.44	1.73	0.93
0.8	100	2221.49	30.59	2181.66	30.10	1.79	1.60
0.8	150	2145.39	30.44	2105.44	29.78	1.86	2.17
0.8	200	2069.28	30.26	2029.21	29.46	1.94	2.65

Tabel C7 (lanjutan)

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0.8	300	1904.81	29.80	1876.73	28.84	1.47	3.24
0.8	350	1826.82	29.55	1800.47	28.53	1.44	3.44
0.8	400	1748.83	29.28	1724.21	28.24	1.41	3.56
0.8	450	1670.83	28.98	1647.95	27.94	1.37	3.59
0.8	500	1592.78	28.67	1571.68	27.66	1.33	3.54
0.8	550	1514.77	28.34	1495.40	27.37	1.28	3.40
0.8	600	1415.71	27.89	1419.11	27.10	0.24	2.85
0.8	650	1336.87	27.52	1342.82	26.82	0.45	2.51
0.8	700	1258.07	27.13	1266.52	26.56	0.67	2.09
0.8	750	1179.20	26.72	1190.22	26.30	0.93	1.58
0.8	800	1092.81	26.25	1113.92	26.04	1.93	0.81
0.8	850	1013.95	25.81	1037.60	25.78	2.33	0.10
0.8	900	935.08	25.35	961.29	25.54	2.80	0.72
0.8	950	856.20	24.88	884.96	25.29	3.36	1.65
0.8	1000	777.30	24.40	808.64	25.05	4.03	2.69
0.8	1050	698.39	23.90	732.31	24.82	4.86	3.84
0.8	1100	619.47	23.39	655.97	24.58	5.89	5.12
0.9	0	2332.70	30.77	2332.69	30.77	0.00	0.00
0.9	50	2295.93	30.72	2256.55	30.44	1.72	0.92
0.9	100	2219.25	30.59	2180.39	30.11	1.75	1.58
0.9	150	2142.57	30.43	2104.23	29.78	1.79	2.14
0.9	200	2065.88	30.25	2028.07	29.46	1.83	2.60
0.9	250	1989.20	30.04	1951.89	29.15	1.88	2.98
0.9	300	1900.18	29.78	1875.71	28.84	1.29	3.14
0.9	350	1821.61	29.52	1799.52	28.54	1.21	3.32
0.9	400	1743.03	29.24	1723.32	28.24	1.13	3.42

Tabel C7 (lanjutan)

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0.7	100	2226.93	30.60	2185.70	30.10	1.85	1.62
0.9	450	1664.45	28.94	1647.12	27.95	1.04	3.42
0.9	500	1585.81	28.62	1570.91	27.66	0.94	3.34
0.9	550	1507.22	28.28	1494.69	27.38	0.83	3.17
0.9	600	1407.41	27.82	1418.47	27.10	0.79	2.57
0.9	650	1327.98	27.43	1342.24	26.83	1.07	2.20
0.9	700	1248.58	27.03	1266.00	26.56	1.40	1.74
0.9	750	1169.13	26.61	1189.76	26.30	1.77	1.18
0.9	800	1082.08	26.14	1113.52	26.04	2.91	0.36
0.9	850	1002.63	25.69	1037.27	25.79	3.45	0.41
0.9	900	923.17	25.22	961.01	25.54	4.10	1.28
0.9	950	843.70	24.74	884.76	25.30	4.87	2.26
0.9	1000	764.21	24.24	808.49	25.06	5.79	3.36
0.9	1050	684.71	23.73	732.22	24.82	6.94	4.59
0.9	1100	605.19	23.21	655.95	24.59	8.39	5.94
AVERAGE ERROR						1.92 14	2.46 12

LAMPIRAN D Contoh perhitungan *Pressure Drop* menggunakan metode Begg's-Brill pada *Injection Well*

Model *CO₂-foam flooding* pada *injection well* dilakukan dengan membagi segmentasi pada *well* setiap kedalaman 50 m. Parameter input yang digunakan pada model adalah seperti yang tertera pada Tabel D.1

Tabel D. 1 kondisi input pemodelan Begg's-Brill

Parameter	Nilai	Satuan
Gravitasi	9.8	m/s ²
Faktor Gravitasi	1	Kg.m/N.s ²
Diameter aliran	0.089	m
Kedalaman sumur	1100	m
Tekanan injeksi	1071	psia
Temperatur	31	C
Laju massa uap injeksi	0.30443	kg/s
Tebal tubing	0.005	m
<i>Absolute roughness</i>	0.0000254	m
Koefisien perpindahan panas	2	Btu/h.F.ft ²

Sedangkan rumus yang digunakan untuk menghitung *pressure drop* adalah sebagai berikut:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) = \frac{f_{tp}\rho v^2}{g_c D} + \frac{\rho g}{g_c} \quad (1)$$

Untuk nilai f_{tp} pada metode Begg's-Brill didapatkan melalui persamaan berikut

$$\frac{1}{\sqrt{f_{tp}}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{\varepsilon}{d} + \frac{21.25}{N_{Re}^{0.9}} \right) \quad (2)$$

Sebelumnya diperlukan nilai bilangan Reynold dari aliran injeksi melalui persamaan

$$N_{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (3)$$

- Menghitung N_{Re}

$$N_{Re} = \frac{527.288 * 0.928 * 0.089}{5.64825E - 05} = 77138.51$$

- Menghitung f_{tp}

$$\frac{1}{\sqrt{f_{tp}}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{0.0000254}{0.089} + \frac{21.25}{77138.51^{0.9}} \right) = 0.4228$$

- Menghitung *Pressure Drop*

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{0.4228 * 527.288 * 0.928^2}{1 * 0.089} + \frac{527.288 * 9.8}{1} = 5167.422853 \frac{Pa}{m}$$

Sehingga apabila tekanan injeksi adalah 1071 psia dan pressure drop didapatkan sebesar $5167.422853 \frac{Pa}{m}$ maka tekanan pada segment berikutnya sebesar 1108.630146psia.

LAMPIRAN E Contoh perhitungan *pressure drop* menggunakan metode Darcy pada *reservoir*

Parameter input yang digunakan dalam perhitungan *Pressure drop* pada *reservoir* adalah seperti yang tercantum pada Tabel

Tabel E. 1 kondisi input pemodelan reservoir dengan Darcy

Parameter	Nilai	Satuan
Jarak <i>injection-production well</i>	100	m
Tebal formasi	10.4	m
Permeabilitas	18.1	mD
Porositas	0.07	-
Deg API	41	° API

Persamaan Darcy mengenai permeabilitas dapat dilihat pada persamaan (2.7)

$$\Delta P = \frac{\mu q L}{k A}$$

- Menghitung μ pada $P = 2097.61$ psia dan $T = 38.25^\circ\text{C}$

$\mu = 8.68638E - 05$ Kg/ms berdasarkan tekanan dan temperatur di reservoir

- Menghitung q

$$q = \frac{m}{\rho} = \frac{0.30443 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{768.5667784 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.000396062 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Menghitung L
 L merupakan panjang segment pada reservoir yang ditentukan yakni 10 m. Dengan jarak total segmen yakni 100 m.
 $L = 10$
- Menghitung k

$$k = 18.1 \text{ mD}$$

$$k = 18.1 \text{ mD} \times 9.869E - 9 \text{ cm}^2$$

$$k = 1.78665E - 14 \text{ m}^2$$

- Menghitung A

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi 10.4^2}{4}$$

$$A = 84.9056 \text{ m}^2$$

- Menghitung ΔP

$$\Delta P = \frac{8.68638E - 05 * 0.000396062 * 10 * 0.000145038}{1.78665E - 14 * 84.9056}$$

$$\Delta P = 32.89(\text{psi})$$

LAMPIRAN F Contoh perhitungan *pressure drop* pada *production well*

Segmentasi pada *production well* sama seperti *injection well* yakni 50 m. Serta dengan kondisi input yang sama pada Tabel D.1

Untuk mendapatkan nilai *pressure drop* pada *production well* digunakan persamaan berikut

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) = \frac{f_{tp} \cdot \rho \cdot v^2}{g_c \cdot d} - \frac{g}{g_c} \rho$$

Sebelumnya diperlukan perhitungan untuk menghitung variabel lain terlebih dahulu

- Menghitung q

$$q = \frac{m}{\rho}$$

$$q = \frac{0.30443}{720.0912}$$

$$q = 0.0004227 m^3/s$$

- Menghitung A

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi 0.089^2}{4}$$

$$A = 0.0062179 \text{ m}^2$$

- Menghitung v

$$v = \frac{q}{A}$$

$$v = \frac{0.0004227}{0.0062179}$$

$$v = 0.067984 \text{ m/s}$$

- Menghitung σ

$$\sigma = 0.07275 \times (1 - 0.002 \times (T - 291))$$

$$\sigma = 0.07275 \times (1 - 0.002 \times (305.1360 - 291))$$

$$\sigma = 0.0706932$$

- Menghitung N_{LV}

$$N_{LV} = v \left(\frac{\rho}{g\sigma} \right)^{0.25}$$

$$N_{LV} = 0.067984 \left(\frac{720.0912}{9.8 \times 0.0706932} \right)^{0.25}$$

$$N_{LV} = 0.38601$$

- Menghitung N_{Fr}

$$Fr = \frac{v^2}{gd}$$

$$Fr = \frac{0.067984^2}{9.8 \times 0.089}$$

$$Fr = 0.00529906$$

- Menghitung $H_L(0)$
 - Jika $N_{FR} < L_1$ maka pola aliran *segregated*.
 - Jika $N_{FR} > L_1$ dan $N_{FR} > L_2$ maka pola aliran adalah *distributed*.
 - Jika $L_1 < N_{FR} < L_2$ maka pola aliran *intermittent*.
 - L_1 dan L_2 dinyatakan dalam persamaan:

Dimana:

$$X = \ln(\lambda)$$

$$X = \ln(1)$$

$$X = 0$$

$$L_1 = \exp(-4.62 - 3.757X - 0.481X^2 - 0.0207X^3)$$

$$L_1 = \exp(-4.62 - 3.757 \times (1) - 0.481 \times (1)^2 - 0.0207X \times (1)^3)$$

$$L_1 = 0.009852796$$

$$L_2 = \exp(1.061 - 4.602X - 1.609X^2 - 0.179X^3 + 0.635 \times 10^{-3}X^5)$$

$$L_2 = \exp(1.061 - 4.602 \times (1) - 1.609 \times (1)^2 - 0.179 \times (1)^3 + 0.635 \times 10^{-3} \times (1)^5)$$

$$L_2 = 2.889258804$$

Nilai $N_{FR} < L_1$, sehingga pola aliran nya adalah *segregated*.

$$H_L(0) = \frac{0.98\lambda^{0.4846}}{N_{FR}^{0.0868}}$$

$$H_L(0) = \frac{0.98(1)^{0.4846}}{(0.00287)^{0.0868}}$$

$$H_L(0) = 1.62886$$

- Menghitung Ψ

$$C = (1 - \lambda) \ln \left[\frac{4.7 N_{LV}^{0.1244}}{\lambda^{0.3692} N_{FR}^{0.5056}} \right]$$

$$C = (1 - 1) \ln \left[\frac{4.7 \times 0.3104^{0.1244}}{1^{0.3692} \times 0.00287^{0.5056}} \right]$$

$$C = 0$$

$$\Psi = 1 + C \left(\sin \emptyset - \frac{1}{3} (\sin \emptyset)^3 \right)$$

$$\Psi = 1 + 2.3691 \times \left(\sin \emptyset - \frac{1}{3} (\sin \emptyset)^3 \right)$$

$$\Psi = 1$$

Dengan nilai $\emptyset = 1,8\theta$, pada kasus ini nilai θ adalah -90° karena aliran vertikal kebawah

- Menghitung $H_L(\theta)$

$$\frac{H_L(\theta)}{H_L(0)} = \Psi$$

$$H_L(\theta) = \Psi \times H_L(0)$$

$$H_L(\theta) = 1 \times 1.62886$$

$$H_L(\theta) = 1.62886$$

- Menghitung S

$$y = \frac{\lambda}{[H_L(\theta)]^2}$$

$$y = \frac{1}{[1.62886]^2}$$

$$y = 0.37699$$

$$S = \frac{\ln y}{-0.0523 + 3.182 \ln y - 0.8725(\ln y)^2 + 0.01853(\ln y)^4}$$

$$S = 0.245727189$$

- Menghitung f_{ns}

Diperlukan nilai Reynold *number* untuk menghitung variable ini, nilai Reynold *number* untuk aliran dua fasa didapatkan melalui persamaan berikut ini.

$$N_{Re} = \frac{[\rho \cdot v \cdot d]}{\mu}$$

$$N_{Re} = \frac{[720.091 \times 0.06798 \times 0.089]}{0.003998786}$$

$$N_{Re} = 1089.574153$$

$$f_{ns} = \left[2 \log \left(\frac{N_{Re}}{4.5223 \log(N_{Re} - 3.8215)} \right) \right]^{-2}$$

$$f_{ns} = \left[2 \log \left(\frac{1089.574153}{4.5223 \log(1721873.766 - 3.8215)} \right) \right]^{-2}$$

$$f_{ns} = 0.010632614$$

- Menghitung f_{tp}

Berdasarkan, maka diperlukan nilai f_{ns} dan S .

$$\frac{f_{tp}}{f_{ns}} = e^S$$

$$f_{tp} = f_{ns} \cdot e^S$$

$$f_{tp} = 0.010632614 \cdot e^{0.245727189}$$

$$f_{tp} = 0.509870689$$

- Menghitung $\frac{\partial p}{\partial z}$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{f_{tp} \cdot \rho \cdot v^2}{g_c \cdot d} - \frac{g}{g_c} \rho$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{1.278550723 \times 977.918 \times 0.05006^2}{1 \times 0.09} + \frac{9.8}{1} 977.918$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) = 7056.893792 \frac{Pa}{m}$$

Sehingga apabila tekanan campuran pada reservoir 1762.95 psia, dengan *pressure drop* $7056.893792 \frac{Pa}{m}$, maka output tekanan segment pertama (segment n) adalah 1711.63651 psia. Dengan nilai tekanan ini, maka temperature juga akan berubah dari 32.1360517°C menjadi 31.95907217°C. Perubahan tekanan dan suhu ini mengakibatkan perubahan pada semua *properties* CO₂-*foam*, maka dari itu output segment n, akan menjadi input untuk segment n+1 dan seterusnya.

BIODATA PENULIS

Nama lengkap penulis adalah Hamzah Yudha Perwira, lahir di Jember pada tanggal 17 Maret 1996 dari ayah bernama Suwiyono dan ibu bernama Sri Andayani. Penulis merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Pada tahun 2008 penulis menyelesaikan Pendidikan setara SD di SDN Sidomekar 08, pada tahun 2011 menyelesaikan Pendidikan setara SMP di SMPN 2 Jember, pada tahun 2014 menyelesaikan Pendidikan di SMAN 1 Jember. Pada tahun yang sama, penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Departemen Teknik Fisika ITS. Hingga tahun ketiga, penulis telah aktif dalam berbagai organisasi dan kepanitiaan, seperti menjadi staff Departemen Internal di Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika ITS (HMTF ITS) periode 2015/2016, menjadi panitia acara yang diadakan HMTF ITS yakni *Engineering Physics Week* 2015 (EPW 2015). Pada tahun 2015, penulis berkesempatan untuk menjadi Wakil Kepala Departemen Internal di HMTF ITS. Pada bulan Juli 2018, penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Optimisasi Kondisi Operasi CO_2 -foam flooding Enhanced Oil Recovery**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi penulis melalui *email: hamzahperwira.hp@gmail.com*